

Утверждаю
Проректор
по учебно-методической работе
А.С. Борзова
«30» ноября 2016 г.



Методическое пособие
для учителей, работающих в инженерных классах
по дополнительной профессиональной программе «Авиаинженер
будущего: Информационный мир 21 века»

Москва, 2016

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**КАФЕДРА
«ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА»**

Козлов А.И., Затучный Д.А.

**«АВИАИНЖЕНЕР БУДУЩЕГО:
РАДИОТЕХНИКА И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»**

**Методическое пособие
для учителей инженерных классов московских школ**

Москва 2016 г.

Рецензенты: д.т.н., проф. Лутин Э.А. (МГТУ ГА)
д.т.н., проф. Сарычев В.А. (ЗАО «Радар-ММС»)

Методическое пособие для учителей инженерных классов московских школ

В методическом пособии излагаются вопросы, связанные с физической сущностью процессов электродинамики и распространения радиоволн, излагаются основные принципы радиолокации. Приведены физические основы радионавигации и рассмотрены основные известные методы определения местоположения воздушного судна. Авторами подробно изложены основные принципы осуществления навигации подвижных объектов по перспективным спутниковым навигационным системам. Методическое пособие снабжено большим количеством подробного иллюстративного материала и может быть полезно учащимся инженерных классов и учителям, ведущим в них занятия.

Данное учебное пособие написано в рамках Соглашения Департамента образования г. Москвы с МГТУ ГА. Методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры «Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» 18.11.2016 г. протокол №4.

Выписка из протокола №4
заседания кафедры ТЭРЭО ВТ от 18.11.2016 г.

Присутствовали:

- | | |
|------------------|---------------------|
| 1. Болелов Э.А. | 12. Матюхин К.Н. |
| 2. Бабаев В.Г. | 13. Прохоров А.В. |
| 3. Бунин А.В. | 14. Хачикян П.П. |
| 4. Горбунов А.Л. | 15. Рубцов В.Д. |
| 5. Дивеев В.Н. | 16. Сафоненков Ю.П. |
| 6. Биктеева Е.Б. | 17. Сергеев В.Г. |
| 7. Козлов А.И. | 18. Стукалов С.Б. |
| 8. Колядов Д.В. | 19. Табунов В.А. |
| 9. Логачев В.П. | 20. Фридзон М.Б. |
| 10. Лукин Э.А. | 21. Яковлева Д.А. |
| 11. Майлов Н.Н. | 22. Яманов Д.Н. |

Повестка дня.

О содержании подготовленного к изданию методического пособия «АВИАИНЖЕНЕР БУДУЩЕГО: Радиотехника и радиоэлектроника. Авторы – Козлов А.И., Затучный Д.А. Методическое пособие для учителей инженерных классов московских школ. Москва 2016 г.

Слушали заведующего кафедрой ТЭ РЭО ВТ Болелова Э.А. Представил содержание подготовленного к изданию методического пособия «АВИАИНЖЕНЕР БУДУЩЕГО: Радиотехника и радиоэлектроника». Авторы – Козлов А.И., Затучный Д.А. Методическое пособие для учителей инженерных классов московских школ. Москва 2016 г. В методическом пособии излагаются вопросы, связанные с физической сущностью процессов электродинамики и распространения радиоволн, излагаются основные принципы радиолокации. Приведены физические основы радионавигации и рассмотрены основные известные методы определения местоположения воздушного судна. Авторами подробно изложены основные принципы осуществления навигации подвижных объектов по перспективным спутниковым навигационным системам. Методическое пособие снабжено большим количеством подробного иллюстративного материала и может быть полезно учащимся инженерных классов и учителям, ведущим в них занятия.

Постановили: методическое пособие «АВИАИНЖЕНЕР БУДУЩЕГО: Радиотехника и радиоэлектроника. Авторы – Козлов А.И., Затучный Д.А. рекомендовать к изданию в печати.

Результаты голосования:

За	22 человека,
Против	0 человек,
Воздержались	0 человек.

 Заведующий кафедрой ТЭ РЭО ВТ  Болелов Э.А.

 Ученый секретарь кафедры ТЭ РЭО ВТ  Стукалов С.Б.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть 1.

НАЧАЛА РАДИОЛОКАЦИИ

Введение	3
1. Электромагнитное поле вокруг нас	4
2. Как описывать электромагнитное поле	6
3. Что такое электромагнитные волны	13
4. Какие задачи решает радиолокация	19
5. Какие сигналы используются в радиолокации	21
6. Что несет в себе радиолокационная информация	22
7. Что такое элемент разрешения	24
8. Как улучшить обнаружение радиолокационных целей	26
9. Какие сигналы воздействуют на вход РЛС	29
10. Как выделять полезный сигнал на фоне шума	32
11. Как принимать решение о наличии радиолокационной цели	34
12. Какие ошибки возникают при принятии решения	35
13. Когда и по каким критериям принимать решения	37
14. Уравнение дальности	39
15. От чего зависит точность измерения и как ее повысить	44
16. Какие неклассические виды радиолокации существуют	45
17. Где сегодня не обойтись без радиолокации	46
Заключение	47

Часть 2.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

1. Распространение радиоволн в свободном пространстве	48
1.1. Среда без потерь	48
1.2. Среда с потерями	52
1.3. Дальность прямой видимости	55
2. Области распространения радиоволн	56
2.1. Почва	57
2.2. Тропосфера	57
2.3. Стратосфера	59
2.4. Ионосфера	60
3. Особенности распространения радиоволн в тропосфере	63
4. Особенности распространения радиоволн в ионосфере	66
5. Области пространства, существенные при распространении радиоволн	69
6. Классификация радиоволн	73
7. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов	78
7.1. Сверхдлинные и длинные волны	79
7.2. Средние волны	80
7.3. Короткие волны	82
7.4. Ультракороткие волны	84
7.5. Дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны	86
7.6. Волны оптического диапазона	88
Заключение	89

ЧАСТЬ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Где-то в пятидесятые годы большинство жителей нашей страны впервые слышали слово "радиолокация". Оно произносилось, как правило, тихим голосом, с большим почтением и уважением к этому слову и несло в себе элемент того, что произносивший это слово причастен к каким-то высшим либо военным, либо научным секретам. Массовые популярные публикации того времени в газетах и журналах, детективные повести и фильмы убеждали читателей и зрителей в существовании очень сложного, способного сотворить чудо средства, которое позволит защитить наше небо от непрошенных гостей, дать возможность самолетам летать в любую погоду, при любой видимости и видеть все, что творится в небесах, на земле и на море. Но шло время и, как это всегда бывает, массовый интерес к радиолокации угас, его вытеснили новые научные и технические успехи, а сама радиолокация стала оформляться в строгую научную дисциплину с четко очерченными границами возможностей и приложений.

Сегодня мы имеем, с одной стороны, классическую учебно-научную дисциплину, вошедшую в обязательную программу подготовки специалистов в области радиотехники, с другой стороны, - удивительные по своим возможностям различные многочисленные радиолокационные станции и устройства, действительно способные совершить невозможное и "увидеть" то, что в житейском плане в принципе невозможно "увидеть".

Фантастический прогресс в науке, технике и технологии, произошедший за последние 50 лет, привел к тому, что радиомир вошел в жизнь каждого из нас как естественный атрибут нашей жизни. Интернет, мобильные телефоны и айфоны, вычислительные машины и комплексы, цифровое телевидение и автомобильные навигаторы стали настолько «своими», что стало трудно

представить, как же мы жили раньше без них. Ну и вершина радиотехники – луноходы и марсоходы, люди на Луне, радиолокация и фотографирование дальних планет и их спутников, с детализацией, позволяющей даже разглядывать камни на поверхности Плутона.

Все эти достижения опираются на знание законов электромагнетизма, электродинамики и электроники, а поэтому, чтобы понять, как рождаются чудеса радиомира и порожденные им чудеса радиолокации, радионавигации и радиосвязи, прежде всего, попытаемся с самых общих позиций подойти к понятию электромагнитного поля.

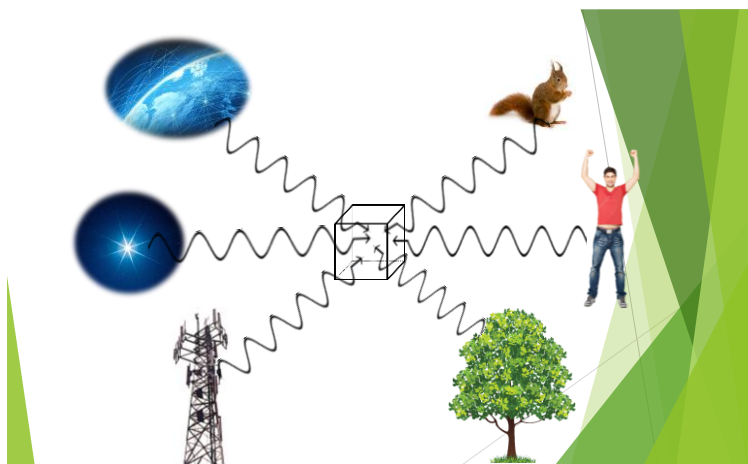
1. Электромагнитное поле вокруг нас

Рассмотрение законов электромагнетизма начнем с того, что обратим внимание на следующий факт, на который, как-то не обращают особого внимания в силу его кажущейся естественности.

Итак, уважаемый читатель, представьте, что вы сидите у телевизора и с легкостью переключаете его каналы -1, 2, 3, 4 и т.д. и видите меняющиеся картинки. Не вставая со своего места, вы берете радиоприемник и с такой же легкостью, прокручивая ручку настройки приемника, слышите голоса из Москвы и Пекина, Лондона и Рима и т.д. Что же явилось источником получаемой вами информации? Ответ простой – токи, наводимые в антенне ваших устройств. Но антенна при ваших настройках не изменяла ни своего вид, ни своего положения в пространстве. Значит там, где расположена антенна, «имеется» информация о всех (!!!) источниках радиоволн, где бы они ни были расположены. Естественно, что данное утверждение справедливо для *любого местонахождения антенны*.

Как известно из курса физики, всякое тело с температурой, отличной от абсолютного нуля (-273°C), является источником электромагнитного излучения, которое также «переносится» через *любой* малый объем пространства, в том числе и тот, где находится наша антенна, и несет информацию о своем источнике.

Аналогичные рассуждения применительно к звездам приводят к обобщению сформулированного утверждения на всю Вселенную, которое будет звучать следующим образом: «Через любой небольшой объем (а смелее, любую точку!) пространства переносится информация о всех естественных и искусственных источниках электромагнитного излучения, расположенных на Земле и во всей Вселенной (!)». На рис. 1 схематически показан потоки электромагнитного излучения от радиостанции, человека, дерева, планеты и звезды, стекающие в малый объем (точку) пространства.



Через **ЛЮБОЙ** бесконечно малый **ОБЪЁМ** пространства переносится **ВСЯ** информация, порождаемая **ВСЕМИ** естественными и искусственными **ИСТОЧНИКАМИ** радиоизлучения **ВСЕЛЕННОЙ!!!**

Рис. 1. Иллюстрация «электромагнитного единства мира»

В этой формулировке не должна смущать ничтожная мощность большинства полей. Вопрос идет о принципиальной стороне вопроса, а не о технологии разделения и выделения информации. Таким образом, можно говорить о, своего рода, электромагнитном «единстве» природы и человека, в частности.

Что касается возможности выделения ничтожных сигналов, то уважаемый читатель, прикиньте, какова мощность сигнала, достигающего Землю с орбиты Плутона, находящегося на расстоянии 5 млрд км при мощности передатчика всего в 60 Вт. И такой сигнал был выделен! О «качестве» такого выделения говорит рис. 2. Не уступают по качеству и фотографии марисанской поверхности с ее легендарными сфинксами (рис. 3).

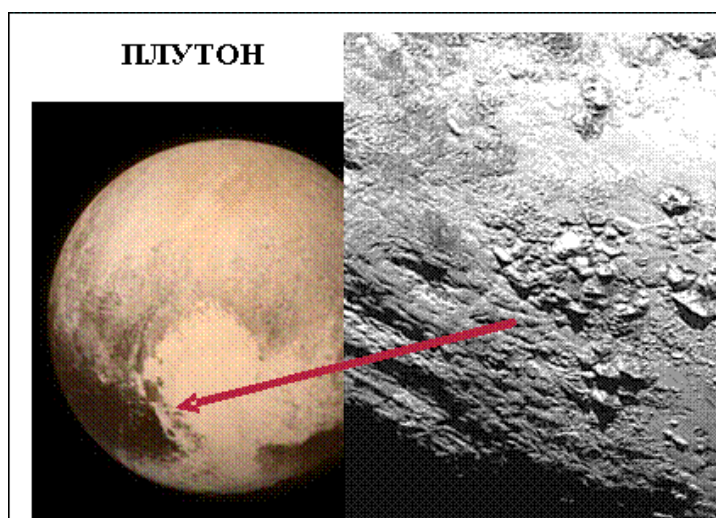


Рис. 2. Фото Плутона и его поверхности

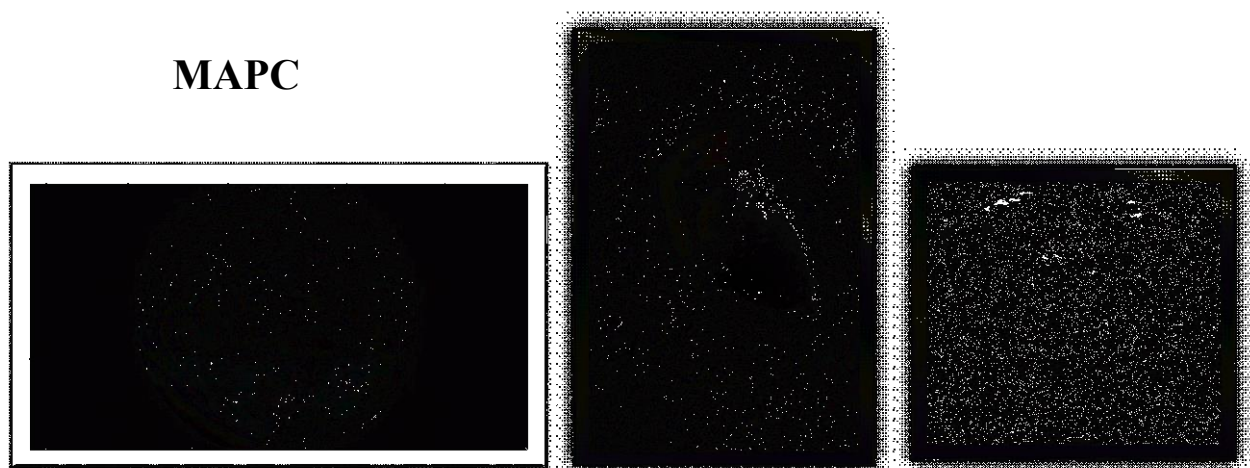


Рис. 3. Фото Марса и его поверхности

Приведенные фотографии ни у кого не должны оставить сомнения в возможностях выделения самых ничтожнейших следов электромагнитного поля.

2. Как описывать электромагнитное поле

В данном контексте хотелось бы особо подчеркнуть, что электромагнитное поле – это не синоним электромагнитных волн или радиоволн, которые есть только частный случай электромагнитного поля.

Автору представляется, что наиболее удачным является такое определение – *«Электромагнитное поле – это некоторая форма*

существования материи, способная переносить энергию и информацию». И ничего более.

В рамках представлений современной физики, если не вторгаться в области микромира и квантовых эффектов, для описания свойств электромагнитного поля, т.е. количественных характеристик названной формы, в каждой точке (!) пространства в каждый момент времени (!) необходимо использовать независимых между собой **52** (!) числа. Понадобились многие десятилетия усилий гениев разных стран Ампера, Вольты, Гаусса, Герца, Джоуля, Кирхгофа, Ленца, Лоренца, Максвелла, Ома, Фарадея, Эрстеда и ряда других, чтобы суметь увидеть, что это именно 52 числа.

Мы приводим фотографии этих гениальных ученых, усилиями которых человечество перешло в принципиально другой период развития своей цивилизации (рис.3).

В большинстве современных подходов в качестве базовых понятий используются 4 вектора – вектора напряженности электрического **E** (3 числа) и магнитного **H** (3 числа) полей, а также вектора электрической **D** (3 числа) и магнитной **B** (3 числа) индукций, описывающих электромагнитное поле в заданной точке пространства Q с координатами (x, y, z) .

Эти вектора связаны между собой уравнениями Максвелла, представляющими собой 4 дифференциальных уравнения, из которых два записываются в векторной, а два – в скалярной формах, т.е. речь идет о 8 скалярных дифференциальных уравнениях, в которых фигурируют производные каждого компонента векторов **E**, **H**, **D**, **B** по времени t , т.е. скорости их изменения (всего $3 \times 4 = 12$ чисел). Кроме того, равноправными членами этих уравнений являются также производные каждого из компонент по каждой из пространственных координат x, y, z , т.е. еще $9 \times 4 = 36$ числа. Таким образом, речь идет о $12 + 12 + 36 = 60$ переменных величинах, связанных между собой 8 уравнениями Максвелла, что дает основание говорить о 60-

8=52 независимых между собой числах, характеризующих электромагнитное поле в точке $Q(x, y, z)$ в момент времени t .

Здесь вполне уместен вопрос, суть которого сводится к следующему. Итак, Максвелл описывал электромагнитное поле, опираясь на вектора **E**, **H**, **D**, **B** и их производные по всем 4 пространственно-временным координатам. С формальной точки зрения уравнения Максвелла представляют собой 8 уравнений, связывающих между собой 52 переменные величины. А что нельзя ли было подобрать другую комбинацию из этих переменных и также связать их другими какими-то уравнениями? Ответ здесь однозначен: «Конечно, можно». Для полного описания электромагнитного поля в ряде задач гораздо удобнее использовать другие характеристики поля такие, например, как векторный **A** и скалярный ϕ потенциалы, вектор Герца **Π**, которые легко пересчитываются в классические вектора **E**, **H**, **D**, **B**.

Так почему же предпочтение отдано векторам **E**, **H**, **D**, **B** и что есть в природе? Исторически сложилось так, что электромагнитное поле, а точнее его проявление, наблюдалось в виде некоторого силового воздействия на электрические заряды, для чего удобно было ввести вектор напряженности электрического поля **E** (электрический вектор), как силу, действующую на единичный заряд. Что касается второй части вопроса: «Так что же есть в природе?». Можно ответить, что в природе нет ни **E**, ни **A**, ни **Π**. Есть электромагнитное поле, а **E**, **A** и **Π** – это инструменты для описания его свойств.

В дальнейшем будем опираться на классическое описание электромагнитного поля через вектора **E**, **H**, **D**, **B**.

Очень важно отметить, что уравнения Максвелла констатируют тот факт, что *любая* (!) среда в рамках электромагнитной теории описывается при помощи всего 3 (!) характеристик – диэлектрической проницаемости - ϵ , проводимости - σ и магнитной проницаемости - μ (сказанное не распространяется на электрически- и магнито- анизотропные среды).

Для изотропных сред вектора $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$ можно выразить через остальные два вектора $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$ при помощи равенств: $\mathbf{D}=\epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}=\mu\mu_0\mathbf{H}$, где $\epsilon_0=8,85\cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м- электрическая и магнитная постоянные соответственно.

Итак, пусть «наблюдатель» находится в точке Q с координатами (x,y,z) , а наблюдение производится в момент времени t . Таким образом, задача сводится к определению векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ в точке Q в тот же момент времени. Иными словами, следует представить $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ в виде некоторых функций четырех переменных, т.е. найти $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ и $\mathbf{H}(x,y,z,t)$. Именно такую задачу решают уравнения Максвелла, которые по существу связывают между собой *линейными зависимостями исключительно производные* компонент векторов $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ и $\mathbf{H}(x,y,z,t)$ по всем четырем переменным. Более того, в качестве коэффициентов при этих производных-слагаемых, входящих в линейные комбинации, выступают только ϵ, ϵ_0 и μ_0 .

Введем обозначения

$\dot{\mathbf{E}}_t = (\dot{E}_x^t, \dot{E}_y^t, \dot{E}_z^t)$ - производные компонент вектора $\mathbf{E}$ по времени,

$\dot{E}_m^n$ - производная m -компонента ($m=x,y,z$) вектора $\mathbf{E}$ по одной из пространственных координате $n=x,y,z$.

Аналогично вводятся обозначения для компонент вектора $\mathbf{H}$.

С учетом введенных обозначений 6 уравнений Максвелла можно представить в виде 2 векторных равенств¹:

$$\left\{ \mathbf{F}_E (\dot{E}_y^z - \dot{E}_z^y, \dot{E}_z^x - \dot{E}_x^z, \dot{E}_x^y - \dot{E}_y^x) + \mu_0 \dot{\mathbf{H}}^t (\dot{H}_x^t, \dot{H}_y^t, \dot{H}_z^t) = 0 \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \mathbf{F}_H (\dot{H}_y^z - \dot{H}_z^y, \dot{H}_z^x - \dot{H}_x^z, \dot{H}_x^y - \dot{H}_y^x) - \epsilon\epsilon_0 \dot{\mathbf{E}}^t (\dot{E}_x^t, \dot{E}_y^t, \dot{E}_z^t) = \mathbf{I}^{cm} \right. \quad (2),$$

где $\mathbf{I}^{cm}$ – плотность стороннего тока.

Оставшиеся 2 уравнения представим в виде простых равенств²

$$\left\{ \dot{E}_x^x + \dot{E}_y^y + \dot{E}_z^z = \rho / \epsilon\epsilon_0 \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \dot{H}_x^x + \dot{H}_y^y + \dot{H}_z^z = 0 \right. \quad (4),$$

¹ Вектора $\mathbf{F}_E$ и $\mathbf{F}_H$ являются развернутой записью оператора «ротор», т.е. $\mathbf{F}_E = \text{rot}\mathbf{E}$, а $\mathbf{F}_H = \text{rot}\mathbf{H}$.

² Выражения в круглых скобках – развернутая запись оператора «дивергенция», т.е. $\text{div}\mathbf{E} = \rho / \epsilon\epsilon_0$, а $\text{div}\mathbf{H} = 0$.

где ρ - объемная плотность заряда.

Как видно, левые части всех уравнений абсолютно идентичны по отношению к векторам $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$. Различие имеет место в правых частях уравнений.

В правой части уравнения (3) фигурирует объемная плотность заряда ρ , а стало быть, уравнение (3) констатирует наличие электрических зарядов. Ноль в правой части уравнения (4) свидетельствует, напротив, об отсутствии магнитных зарядов. Итак, одним из источников электрического поля являются электрические заряды.

Уравнение (1) свидетельствует, что если вектор $\mathbf{H}$ не меняется во времени, т.е. $\dot{\mathbf{H}}_t \equiv 0$, то, стало быть, таким же свойством обладает вектор $\mathbf{E}$, а, следовательно, электрическое и магнитное поля существуют раздельно независимо друг от друга.

Ну, а что же порождает магнитное поле? Чтобы найти ответ на этот вопрос рассмотрим уравнение (2).

Пусть теперь, наоборот, вектор $\mathbf{E}$ не меняется во времени, т.е. $\dot{\mathbf{E}}_t \equiv 0$, тогда $\mathbf{F}_H (\dot{H}_y^z - \dot{H}_z^y, \dot{H}_z^x - \dot{H}_x^z, \dot{H}_x^y - \dot{H}_y^x) = \mathbf{I}^{cm}$. Как видно источником магнитного поля является постоянный электрический ток.

Что же является источником электромагнитного поля и как его можно искусственно создать?

Наличие переменного тока приведет, к изменению во времени магнитного поля, что повлечет за собой появление переменного электрического поля и т.д., а это уже дает возможность говорить о возникновении электромагнитного поля.

Электромагнитное поле возникает и тогда, когда с течением времени происходит изменение плотности электрических зарядов ρ , т.е. возникает переменный электрический ток, влекущий за собой цепочку переменный вектор $\mathbf{E}$ – переменный вектор $\mathbf{H}$ и т.д.

Несколько слов об электрических зарядах. В рамках наиболее распространенных моделей, поясняющих электромагнитные процессы, используется понятие элементарного заряда, которым обладает электрон. Однако из уравнений Максвелла такая интерпретация не следует. В них фигурирует несколько другая характеристика материи - объемная плотность заряда ρ . Они утверждают, что могут существовать такие точки в пространстве, где концентрация «заряда» может быть очень высокой и не более того. Здесь под зарядом понимается опять-таки форма существования материи с пространственными неоднородностями. Для всей электротехники и всей радиотехники электронная модель является вполне приемлемой, а потому общепринятой. В квантовой электродинамике такая модель заряда, увы, никак не приемлема, а поэтому там подходы совсем иные.

Аналогичные рассуждения можно провести в отношении электрического тока и в рамках общепринятых моделей его можно рассматривать, как движение электрических зарядов. Однако в ряде случаев, как например, при прохождении тока через конденсатор такая интерпретация тока в принципе не приемлема. Чтобы удовлетворить требованию непрерывности тока на участке между обкладками конденсатора, вводится понятие «тока смещения», равного производной вектора напряженности магнитного поля по времени - $\dot{\mathbf{H}}_t$, который, как раз, оказывается численно равным току проводимости во внешней цепи конденсатора.

Находясь в рамках классической моделей тока как движение заряженных частиц, мы должны на вопрос, что же является источником электромагнитного поля, ответить: «ВСЁ!». Поскольку, в рамках принимаемой нами «электронной» модели, все атомы содержат электроны, которые находятся в непрерывном движении, все (!) материальные объекты, температура которых отлична от абсолютного нуля, являются источником электромагнитного излучения, т.е. *каждый из нас* непрерывно порождает электромагнитное поле. Этим же свойством обладают вся находящаяся вокруг нас мебель, стены и пол,

столы и стулья, двери и окна. Конечно, мощность этого излучения очень мала, но в рамках наших рассуждений это совсем не принципиально. Самым мощным естественным источником излучения является Солнце. Мощным излучателем являются грозовые молнии. Наконец, надо сказать о космическом излучении, непрерывно воздействующим на нашу планету.

То, о чем было сказано, демонстрирует естественные источники электромагнитного излучения, представляющие по своей сути непрерывно работающие генераторы электромагнитного поля. С точки зрения земного жителя это так называемое фоновое излучение.

Остановимся еще на одном моменте.

Уравнения Максвелла описывают электромагнитное поле в любой точке пространства $Q(x,y,z)$ в произвольный момент времени t . Пусть источник электромагнитного поля находится в некоторой точке P и пусть в точке Q , где проводится наблюдение, электрическая проводимость отлична от нуля и равна σ . В этом случае, чтобы обеспечить равенство в уравнении (2), необходимо будет учесть возникновение индуцируемого тока, плотность которого будет равна $\mathbf{I}^{ind} = \sigma \mathbf{E}$. Этот ток будет являться источником собственного электромагнитного поля, которое носит название рассеянного поля, а, если оно наблюдается в точке P , то – отраженного поля..

Принимая уравнения Максвелла за «истину», элементарно доказывается факт распространения электромагнитного поля в пространстве. Основание для такого утверждения является тот факт, что поле при помощи этих формул можно определять в любой точке пространства в любой момент времени.

Ясно, что по мере удаления от источника электромагнитного поля длина векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$, т.е. их модули $|\mathbf{E}|$ и $|\mathbf{H}|$, должны уменьшаться. Возникает вопрос о законах такого уменьшения. Из электродинамики известно, что плотность потока энергии, переносимой электромагнитным полем, на достаточно большом расстоянии от его источника пропорциональна $|\mathbf{E}|^2$, а отношение $|\mathbf{E}|/|\mathbf{H}| = 120\pi$.

Будем считать, что $|\mathbf{E}|^2$ в зависимости от расстояния до источника R убывает по закону $|\mathbf{E}|^2 = \frac{\alpha}{R^n}$, где α - некоторый не играющий для данной роли коэффициент, а n – параметр, подлежащий определению.

В этом случае, энергия, переносимая электромагнитным полем через любую сферу, окружающую сферу, должна быть постоянной величиной, что требует условие переноса энергии в свободном пространстве, т.е.

$$|\mathbf{E}|^2 \cdot S_{\text{сферы}} = \frac{\alpha}{R^n} \cdot 4\pi R^2 = 4\pi\alpha R^{2-n} = \text{const}, \text{ следовательно } n=2.$$

Таким образом, условие переноса энергии требует зависимости $|\mathbf{E}|^2 \sim \frac{1}{R^2}$ и, следовательно, $|\mathbf{E}| \sim \frac{1}{R}$.

3. Что такое электромагнитные волны

Итак, в точке наблюдения Q с координатами (x_0, y_0, z_0) на достаточно большом расстоянии от источника электромагнитного излучения основной характеристикой электромагнитного поля выступает изменяющейся по направлению и во времени вектор $\mathbf{E}(x_0, y_0, z_0; t)$, именно изменение которого дает возможность «читать» информацию, которая путем изменения тока $\mathbf{I}$ в источнике передается наблюдателю,

Наблюдатель, желая извлечь передаваемую ему информацию, в конечном счете, опирается на какой-то измеренный им параметр $S(t)$ и изучает его изменение во времени, а, если этот параметр векторный $\mathbf{S}(t)$, то и его пространственное изменение.

Итак, наблюдатель имеет дело с некоторой функцией $S(t)$. Великая теорема великого математика Ж. Фурье утверждает, что любую физически реализуемую функцию можно представить в виде суммы синусоидальных функций различных частот ω от нулевой до бесконечной (рис. 4а), т.е.

$$S(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + A_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + \dots,$$

где каждое слагаемое носит название гармонической (спектральной) составляющей или просто гармоники.

коэффициенты A_n ($n=0, 1, 2, \dots$) амплитуды составляющих,

ω_n – частота n -ой гармоники,

φ_n – начальная фаза n -ой гармоники.

Часто вместо частоты ω , измеряемой в rad/c , используется частота $f=\omega/2\pi$, измеряемая в $Гц$.

Весь набор частот называется спектром, а разность максимальной и минимальной частот – шириной спектра – Δf . При этом под максимальной и минимальной частотами понимают предельные значения частот, амплитуда (интенсивность) которых превосходит некоторый условно заданный уровень, например, уровень 0,1 или 0,2 и т.п., по отношению к максимальной амплитуде интенсивности, которой обладает одна из гармоник (рис. 4б).

Значения A_n , ω_n , φ_n и n – определяются конкретным видом функции $S(t)$.

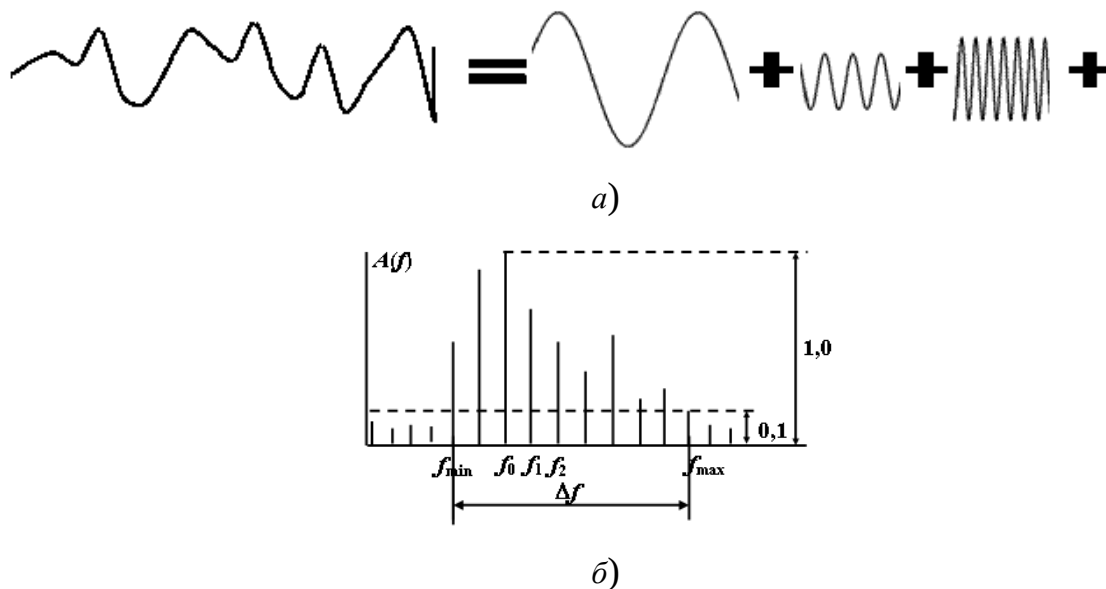


Рис. 4. К иллюстрации преобразования Фурье

Если перейти к другой точке наблюдения, то представление $S(t)$ следует записать точно в такой же форме. Чтобы избежать путаницы, целесообразно «синхронизовать» эти выражения, т.е. учесть набег фаз $\Delta\psi$ от источника до точки наблюдения, находящейся на расстоянии R от него:

$$\Delta\psi = \frac{\omega}{c} R = \frac{2\pi}{\lambda} R = kR,$$

где $c=3\cdot 10^8$ м/с – скорость света,

λ - длина волны,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{волновое число.}$$

Таким образом, общая запись выражения для $S(t)$ примет вид:

$$S(t) = A_0 + A_1 \sin\left[\omega_1\left(t - \frac{R}{c}\right) + \varphi_1\right] + A_2 \sin\left[\omega_2\left(t - \frac{R}{c}\right) + \varphi_2\right] + \dots$$

Как видно, искомый параметр, характеризующий электромагнитное поле, представлен в виде суммы колебательных (волновых) процессов. Это позволяет считать, что электромагнитное поле представляет собой сумму электромагнитных волн различных частот. При такой интерпретации в дальнейшем мы будем иметь дело с электромагнитными волнами той или иной частоты.

Число слагаемых в написанной сумме определяется степенью отличия функции $S(t)$ от синусоиды. Чем больше резких изменений, скачков имеет функция $S(t)$, тем больше требуется слагаемых, тем более высокие частоты необходимо использовать для ее описания.

В соответствии с принципом суперпозиции и линейности уравнений Максвелла, можно утверждать, что источник электромагнитного поля, а это будем считать переменный ток $I(t)$, также можно представить в виде набора гармоник тока тех же частот:

$$I(t) = B_0 + B_1 \sin(\omega_1 t + \beta_1) + B_2 \sin(\omega_2 t + \beta_2) + \dots$$

Проиллюстрируем сказанное.

Пусть в точке M с координатами (x_M, y_M, z_M) расположен источник, порождающий радиоволну на частоте ω_0 :

$$E(t) = B \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

На расстоянии R в точке Q осуществляется наблюдение этой радиоволны, результатом чего является возникновение сигнала той же частоты:

$$S(t) = \frac{\alpha B}{R} \sin \left[\omega_0 \left(t - \frac{R}{c} \right) + \varphi_0 \right],$$

где α - некоторый не играющий никакой роли для проводимого рассмотрения коэффициент, учитывающий направленность излучения и условия распространения радиоволны.

В такой постановке информация, которую может получить наблюдатель, состоит только в констатации факта наличия радиоволны частоты ω_0 , т.е. в формировании известной ему функции $S_0(t)$.

Если наблюдателем будет получена другая функция $S_1(t)$, то для него это будет свидетельствовать о появлении какой-то неизвестной ему информации.

Образно говоря, *«искажение»*, внесенное в функцию $S_0(t)$, и есть *передаваемая информация*.

Чтобы изменить $S_0(t)$, необходимо внести изменения в распределение тока I , что повлечет изменение в функции $E(t) = B \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$.

Изменению может подвергнуться амплитуда – B (*амплитудная модуляция – АМ*), частота – ω_0 (*частотная модуляция – ЧМ*), начальная фаза – φ_0 . Наконец, можно внести дополнительную, меняющуюся во времени фазу – $\psi(t)$ (*фазовая манипуляция – ФМ*).

Для $E(t)$ запишем новое соотношение

$$E(t) = B(t) \sin[\omega_0(t) + \psi(t) + \varphi_0(t)]$$

Полученная функция может быть разложена в ряд Фурье, т.е. представлена в виде суммы синусоид различных частот.

Следовательно, в точке наблюдения Q функция $S(t)$, будет представлять аналогичную сумму. Ширина спектра принимаемого сигнала будет равна ширине спектра излучаемого (о специальном случае, связанном с эффектом Доплера разговор будет ниже).

Ситуация передачи информации от источника к потребителю типична для радиосвязи, телевидения и в ряде случаев для радионавигации.

Остановимся на простейшем случае *АМ*. Пусть речь идет о передаче информации в виде синусоидального сигнала частоты Ω при помощи электромагнитной волны частоты ω_0 (несущая частота). В этом случае

$$B(t) = B_0[1 + m \sin(\Omega t + \gamma_0)], \text{ где } m - \text{ так называемый, индекс модуляции}$$

тогда

$$\begin{aligned} S(t) &= B_0[1 + m \sin(\Omega t + \gamma_0)] \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ &= B_0 \left[\sin(\omega_0 t + \varphi_0) + m \frac{\sin[(\omega_0 - \Omega)t + (\varphi_0 - \gamma_0)] - \sin[(\omega_0 + \Omega)t + (\gamma_0 + \varphi_0)]}{2} \right] \end{aligned}$$

т.е. амплитудная модуляция приводит к возникновению двух дополнительных гармоник на частотах $(\omega_0 - \Omega)$ и $(\omega_0 + \Omega)$, а ширина спектра составляет 2Ω .

Будем считать, что частота Ω - это максимальная частота в спектре передаваемого сигнала, обеспечивающая восстановление передаваемой информацией с требуемой точностью.

Ясно, что для того, чтобы была возможность осуществить передачу другой аналогичной информации, несущая частота ω_1 должна отстоять от частоты ω_0 , по крайней мере, на величину большую, чем 2Ω , т.е. $\omega_1 > \omega_0 + 2\Omega$ или $\omega_1 < \omega_0 - 2\Omega$.

При передаче речевого сигнала значение 2Ω не превосходит 20 кГц , а для передачи телевизионного сигнала эта величина составляет $6,5 \text{ МГц}$.

Аналогичная ситуация имеет место при частотной модуляции и фазовой манипуляции.

На рис. 5-7 показаны сигналы с амплитудной модуляцией (АМ), частотной модуляцией (ЧМ) и фазовой манипуляцией.

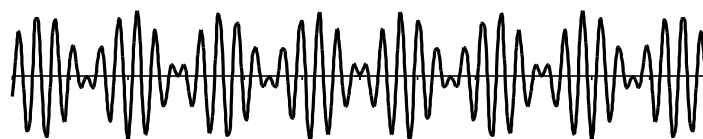


Рис. 5.

Сигнал с амплитудной модуляцией

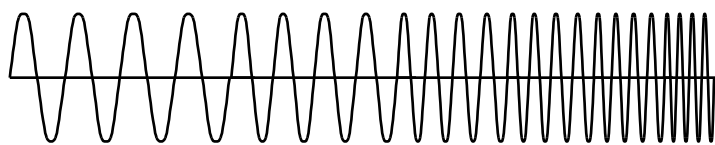


Рис. 6.

Сигнал с амплитудной модуляцией

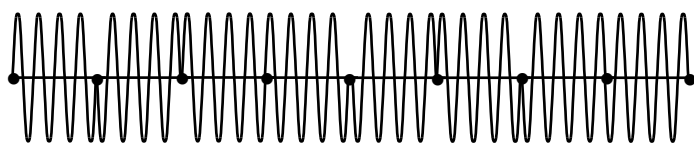


Рис. 7.

Сигнал с фазовой манипуляцией

Рассмотрим ситуацию, относящуюся к радиолокации. Здесь излучение и прием радиоволны происходит в одной и той же точке.

Излученный сигнал по-прежнему имеет вид $E(t) = B(t)\sin[\omega_0 t + \varphi_0]$. Волна, достигнув неподвижной цели, индуцирует на ее поверхности ток I , порождающий новую электромагнитную волну той же конфигурации и той же частоты ω с начальной фазой φ_1 . Достигнув точки приема, сигнал будет иметь вид:

$$S(t) = \frac{\alpha_1 B \sigma}{R^2} \sin \left[\omega_0 \left(t - \frac{2R}{c} \right) + \varphi_0 + \varphi_1 \right],$$

где α_1 - некоторый не играющий никакой роли для проводимого рассмотрения коэффициент, учитывающий направленность излучения и условия распространения радиоволны туда и обратно,

σ - коэффициент, учитывающий конфигурацию и электрофизические характеристики радиолокационной цели, он носит название эффективный поперечник (площадь) рассеяния (ЭПР) или эффективной отражающей поверхности (ЭОП), размерность этой величины m^2 .

Какую же информацию несет отраженная волна? Во-первых, наличие этой волны свидетельствует о самом факте наличия цели. Во-вторых, появление отраженной волны, спустя время $2R/c$, несет информацию о расстоянии до цели. Наконец, интенсивность отраженной волны *при наличии каких-то калибровочных оценок* дает возможность проводить оценку ЭПР цели - σ , т.е. выносить заключение о типе цели.

ЭПР в сильной степени зависит от угловой ориентации цели и даже небольшой ее поворот в сильной степени влияет на значение σ , а поэтому, чаще всего, используют его среднее и среднее квадратичное значения.

В случае, если цель движется и составляющая ее скорости в направлении на точку передачи-приема v_R отлична от нуля, то частота отраженного сигнала увеличивается или уменьшается на величину, так называемой, доплеровской частоты $\omega_{don} = 2\pi v_R / \lambda$, т.е. вместо ω_0 следует писать $(\omega_0 \pm \omega_{don})$, что дает возможность, находясь в точке приема, оценивать радиальную скорость цели.

Далее рассмотрим физические принципы, на которые лежат в основе радиолокации, ее возможности и некоторые проблемы, стоящие перед ней как наукой, а также проиллюстрируем некоторые достижения в области радиолокационной техники рядом примеров.

4. Какие задачи решает радиолокация

Рассмотрение начнем с постановки основной задачи радиолокации. Эту задачу можно сформулировать следующим образом:

Пусть наблюдатель находится в точке 0, он хочет узнать, что находится в некоторой другой точке 1 и какими физическими и геометрическими характеристиками "это" обладает. Чем располагает наблюдатель? Он имеет возможность излучать радиоволны и концентрировать при помощи антенны основную долю излучаемой энергии в заданном направлении. (*Принципиальный момент: несмотря на то, что основной поток энергии каким-то образом сконцентрирован в пространстве, энергия излучается по всем направлениям без исключения*). Наблюдатель имеет возможность

принимать отраженные радиоволны с требуемого направления. (*Принципиальный момент: прием отраженных радиоволн осуществляется, тем не менее, со всех направлений без исключения*). Наблюдатель также может обладать определенными сведениями об объекте наблюдения (радиолокационная цель) и об окружающей среде.

Сказанное позволяет отнести радиолокацию к классу задач дистанционного зондирования.

Подводя итог сказанному, можно сформулировать три узловых задач радиолокации:

1. Обнаружить цель.
2. Измерить параметры цели, а именно – дальность до цели, угловое положение цели, скорость цели.
3. Провести классификацию цели.



Рассмотрим теперь, какие физические процессы происходят при осуществлении радиолокационного зондирования.

Итак, наблюдатель излучает радиоволну, которая, спустя какое-то время, достигает точки 1, где наводит на исследуемом объекте электрические и магнитные токи, которые, в свою очередь, порождают радиоволны, распространяющиеся по всем направлениям, в том числе и в направлении на точку 0. Отраженная радиоволна достигает точки 0, где в приемнике радиолокационной станции вызывает появление соответствующего сигнала (тока, напряжения). Ясно, что вся получаемая информация (а это изменение амплитуды, фазы и частоты излученной волны, т.е. ее искажение) о наблюдаемой цели может быть получена только из сравнения, излученного и

принятого сигналов. Будучи извлеченной, эта информация будет выражаться на языке электрических сигналов, а не на языке каких-либо физических или геометрических характеристик цели. Перевод с одного языка на другой - это другая самостоятельная задача.

5. Какие сигналы используются в радиолокации

В радиолокации используются радиоволны с длиной волны, приходящейся на сантиметровый (реже дециметровый) и миллиметровый диапазоны. Сам же вид излучаемого сигнала оказывается достаточно прост. Как правило, это последовательность коротких во времени импульсов, следующих один за другим через время, много превосходящее длительность этих импульсов. Ширина спектра таких сигналов Δf в подавляющем большинстве случаев оказывается во много раз меньше несущей частоты излучаемого сигнала f_0 , то есть у радиолокационных сигналов (за исключением особых случаев) отношение $\Delta f/f_0 \ll 1$.

Для функций $U(t)$, обладающих таким свойством (узкополосные сигналы), как это впервые показал Гильберт, допустимо представление $U(t)=A(t)\cos(2\pi f_0 t+j(t))$, где $A(t)$ и $j(t)$ - медленно за период высокой частоты $T=2\pi/f_0$ меняющиеся во времени функции.

Оказывается, такое на вид простое представление, каковым является выражение (1), несет в себе серьезную проблему, превращающую радиолокацию с точки зрения решения стоящих перед ней задач в класс особых наук, что крайне принципиально.

Выше уже говорилось, что когда волна, излученная источником, находящемся в точке A , достигает какую-то электрическую неоднородность, на последней индуцируются токи, которые сами становятся источниками радиоволн, распространяющимся по всем направлениям, в том числе, и в направлении на источник A . Эта волну принято называть «отраженной волны», именно она несет информацию об электрической неоднородности

Отраженная радиоволна, естественно, также будет иметь вид, определяемый равенством (1). Если цель неподвижна, то частота отраженного сигнала не изменится, а изменения претерпят лишь его амплитуда и фаза.

Облучению подвергнутся также все остальные цели и, в частности, те из них, которые расположены на том же расстоянии от радиолокационной станции (назовем эти цели, например, 2 и 3), что и исследуемая цель 1.

Естественно, что радиоволны, отраженные от целей 1, 2 и 3, одновременно достигнут точки 0, где расположена радиолокационная станция. В этом случае сигнал в точке 0 найдется простым сложением трех сигналов типа того, что определено равенством (1). Это значит, что и суммарный сигнал будет также иметь тот же вид, что и представление (1), независимо от того, присутствует или отсутствует обнаруживаемая цель.

Это значит, что независимо от ситуации наличия или отсутствия цели в общем случае на входе радиолокационного приемника всегда присутствует сигнал одного и того же вида - квазигармоническое колебание.

6. Что несет в себе радиолокационная информация

Следующий важный вопрос состоит в том, чтобы выяснить, а что вообще несет в себе радиолокационная информация, то есть, иными словами, а что вообще можно получить из радиолокационных измерений. Для получения ответа на этот вопрос отвлечемся от воздействия помех и влияния среды распространения радиоволн. Чтобы такая картина представлялась реальной, можно просто считать, что интенсивность волны, отраженной от исследуемой цели, существенно превосходит соответствующие величины для помехового сигнала.

Итак, приступим к поиску ответа на поставленный вопрос. Для этого прежде всего выберем некоторую ортогональную систему координат (x, y) , в которой в дальнейшем будем проводить анализ протекающих процессов. Сначала будем считать, что излучается радиоволна, у которой электрический вектор $E_{изл}$ имеет только x -компоненту (горизонтальная поляризация). Если не накладывать никаких дополнительных ограничений, то электрический вектор

отраженной радиоволны $\mathbf{E}_{отр}$ в общем случае будет иметь иную, чем вектор $\mathbf{E}_{изл}$, ориентацию в пространстве. Иными словами, в выбранной системе координат поле $\mathbf{E}_{отр}$ будет иметь два компонента $(E_x)_{отр}$ и $(E_y)_{отр}$. Ясно также, что между интенсивностями отраженной и излученной радиоволн (а стало быть, между длинами векторов $\mathbf{E}_{отр}$ и $\mathbf{E}_{изл}$) имеет место прямая пропорциональность. Это приводит к тому, что $(E_x)_{отр}$ будет пропорционально $(E_x)_{изл}$, прямая пропорциональность будет также между $(E_y)_{отр}$ и $(E_x)_{изл}$.

Обозначим соответствующие коэффициенты пропорциональности соответственно S_{xx} и S_{xy} , то есть

$$(E_x)_{отр} = S_{xx} (E_x)_{изл},$$

$$(E_y)_{отр} = S_{xy} (E_x)_{изл}.$$

Если вернуться к представлению радиолокационного сигнала в виде выражения (1), то у каждого из компонентов отраженной радиоволны в общем случае после отражения от цели появится некий фазовый сдвиг по отношению к излученной радиоволне.

Запишем временное представление для ортогональных компонентов электрического вектора отраженной радиоволны в следующем виде:

$$(E_x(t))_{отр} = S_{xx} A(t) \cos(2\pi f_0 t + j(t) + \Phi_{xx}),$$

$$(E_y(t))_{отр} = S_{xy} A(t) \cos(2\pi f_0 t + j(t) + \Phi_{xy}).$$

Как видно из формулы (3), при облучении цели горизонтально поляризованной радиоволной отраженная радиоволна определяется некоторыми четырьмя параметрами, характеризующими радиолокационную цель: S_{xx} , S_{xy} , Φ_{xx} , Φ_{xy} .

К аналогичному результату мы придем, если будем рассматривать радиоволну, имеющую лишь одну у-компоненту (вертикально поляризованная радиоволна). В этом случае мы выйдем на другие четыре характеристики радиолокационной цели: S_{yy} , S_{yx} , Φ_{yy} , Φ_{yx} .

В общем случае, если излученная радиоволна имеет произвольную поляризацию, то есть два компонента электрического вектора $(E_x)_{изл}$ и $(E_y)_{изл}$,

полное описание радиолокационной цели может быть проведено при помощи упомянутых выше восьми чисел.

Однако, как это следует из электродинамики, перекрестные элементы в перечисленном перечне характеристик оказываются равными, то есть $S_{xy}=S_{yx}$ и $\Phi_{xy}=\Phi_{yx}$. Сказанное означает, что цель описывается не восьмью, а шестью числами. Если опираться на реальности измерений, то сомнительной представляется надежность абсолютных измерений амплитуд и фаз. Именно поэтому речь, конечно, может идти об относительных измерениях, а стало быть, об относительных и нормированных характеристиках. При таком подходе число определяющих радиолокационную цель параметров сокращается до четырех, в качестве которых могут, например, выступать следующие: S_{xx}/S_{yy} , S_{xy}/S_{yy} , $\Phi_{xx} - \Phi_{yy}$, $\Phi_{xy} - \Phi_{yy}$.

7. Что такое элемент разрешения

Казалось бы, мы имеем даже определенное преимущество по сравнению с наблюдением в оптическом диапазоне, где объект характеризуется двумя числами: яркостью (коэффициентом отражения) и цветом (какая-либо количественная характеристика цвета). Однако дело обстоит далеко не так. Прежде всего, заметим, что в подавляющем большинстве используемых на практике радиолокационных станций (РЛС) измеряемым параметром является всего лишь одно единственное число - коэффициент отражения. Однако это не самое главное при сравнении с оптическими устройствами. Главное же состоит в следующем.

В любой рассматриваемый момент времени на входе приемного устройства формируются сигналы, порожденные радиоволнами, отраженными от различных целей, находящихся на одинаковом расстоянии R от точки приема. Прием отраженных радиоволн антенной в основном осуществляется в пределах некоторого телесного угла $\Delta\Omega$, для количественной оценки которого можно использовать два плоских угла $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ в двух взаимно перпендикулярных сечениях этого телесного угла. (Величина каждого из углов

$\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ определяется отношением λ/d длины волны λ к линейному размеру антенны d в соответствующих сечениях.

Таким образом, на выходе приемной антенны возникают токи, обязанные своим происхождением электрическим и магнитным токам, возбужденным падающей волной на прямоугольной площадке с линейными размерами $R\Delta\alpha$ и $R\Delta\beta$, находящейся от антенны на расстоянии R . Принципиальное отличие оптики от радиолокации заключается в размерах этой площадки. Для больших наземных радиолокационных станций углы $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ составляют десятки угловых минут, что соответствует отношению λ/d порядка $(3 - 5) \cdot 10^{-3}$. На расстоянии 50 км от антенны для этого случая линейный размер площадки составит величину порядка 400 - 600 м. В данном примере речь идет об очень больших и весьма редких антеннах. Для большинства же антенн сантиметрового диапазона отношение λ/d примерно равно 0,03 - 0,05, что на порядок хуже приведенного примера. Для оптики при диаметре антенны всего лишь в 1 см искомое отношение составляет величины порядка 10^{-5} , а поэтому размеры рассматриваемой площадки для оптики оказываются принципиально иными.

Не вдаваясь в подробности, а сославшись лишь на авторитет великого Рэлея, следует отметить, что все объекты, расположенные вдоль одного направления в пределах дальности, равной $ct/2$, будут восприниматься наблюдателем как один объект (здесь c - скорость света, t - длительность зондирующего импульса). Для ориентировки проведем оценочный расчет этой величины. Если использовать "обычный" радиолокатор, то для него длительность импульса следует принять равной на уровне 1 мкс; это для искомого размера даст величину порядка 150 м, что весьма существенно.

Таким образом, все объекты, находящиеся в пределах параллелепипеда с размерами $R\Delta\alpha$ и $R\Delta\beta$ и $ct/2$ (этот параллелепипед носит название разрешаемого объема, или элемента разрешения) будут восприниматься как *одна цель*.

Из проблемы уменьшения этого объема вытекают почти все проблемы радиолокации.

8. Как улучшить обнаружение радиолокационных целей

Даже в рамках неизменного элемента разрешения имеются дополнительные возможности для улучшения обнаружения находящихся там радиолокационных целей. К достаточно эффективным следует отнести поляризационные методы. Их суть сводится к следующему. При изменении вида поляризации излучаемой радиоволны происходит изменение мощности отраженной радиоволны. Ясно, что всегда найдется такой вид поляризации зондирующей радиоволны, при которой отношение мощностей радиоволн, отраженных от исследуемой цели и фоновых объектов, находящихся в элементе разрешения, будет максимально. Теоретические расчеты и экспериментальные результаты показывают, что увеличение радиолокационного контраста для многих типичных ситуаций в среднем составляет 5 - 8 децибел, достигая в отдельных случаях 20 децибел и более. Существенный рост контраста дает возможность соотносить измеренные элементы матрицы рассеяния с исследуемой радиолокационной целью.

До сих пор речь шла о неподвижных по отношению к радиолокационной станции целях. В случае их движения отраженный сигнал (эффект Доплера) имеет другую по отношению к исходному сигналу частоту, которая отличается от основной частоты на величину, пропорциональную отношению радиальной составляющей скорости цели к длине волны. Если в элементе разрешения движущейся является только исследуемая цель, то, осуществляя прием отраженных радиоволн на частотах, не совпадающих с частотой зондирующего сигнала, можно разделить сигналы, идущие от исследуемой цели и от окружающего его фона. (Это направление получило в радиолокации название селекции движущихся целей (СДЦ). Системами СДЦ снабжены очень многие современные радиолокационные станции (РЛС).)

Наконец есть еще один, хотя и достаточно экзотический, метод повышения радиолокационного контраста. Речь идет о радиолокационных целях, отраженный сигнал от которых содержит частоты, кратные по отношению к частоте зондирующего сигнала - $2f_0$, $3f_0$ и т.д. Таким свойством, как правило, обладают объекты, имеющие ржавчину, трущиеся элементы, контакты и т.п. Если другие объекты такими экзотическими свойствами не обладают, то соответствующий радиолокационный контраст может быть увеличен на десятки децибел.

Вновь вернемся к элементу разрешения. Для уменьшения его размеров по дальности есть только один путь: уменьшить длительность зондирующего сигнала. Современные РЛС специального назначения могут формировать импульсы наносекундной длительности, что обеспечивает разрешение по дальности до десятков сантиметров. Если уменьшение длительности импульсов связано с техническими и конструктивными ограничениями, то проблема уменьшения горизонтального и вертикального размеров элементов разрешения, то есть углов $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$, наталкивается на физическое ограничение, связанное с тем, что углы $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ пропорциональны отношению λ/d . Переход от сантиметрового к миллиметровому диапазону волн дал возможность сократить линейные размеры элемента разрешения в 3 - 5 раз при соответствующем сравнении с сантиметровым диапазоном. Дальнейшее уменьшение длины волны наталкивается на проблему резкого увеличения энергетических потерь радиоволны на трассе распространения вследствие роста поглощения и рассеяния в атмосферных метеообразованиях. Кроме того, возникающие при этом технические и конструкторские проблемы зажигают красный свет перед волнами короче 1 мм.

Второй путь, связанный с уменьшением отношения λ/d , связан с увеличением линейных размеров антенны. "Лобовая" атака на эти размеры приводит к появлению очень больших антенных систем и конструкций. Однако, поскольку вся "игра" идет на соотношениях между фазами тока в

различных точках антенны, а в сантиметровом и миллиметровом диапазонах фазе в 90° соответствуют расстояния, измеряемые миллиметрами и их долями, проблема юстировки таких систем, их защита от температурного расширения, ветрового и дождевого воздействия, колебаний почвы и т.п. представляет собой самостоятельную проблему исключительной сложности. Сказанного достаточно, чтобы понять уникальность таких антенн и их сверхдорогую стоимость при разработке и эксплуатации. Тем не менее, такие антенны существуют, но их число в мире исчисляется единицами. Антенны более скромных размеров размещаются на земле или на передвижных средствах. Однако вполне понятно, что получить у таких антенн отношение λ/d слишком большим (свыше 150 - 200) не представляется реальным.

Для антенн, устанавливаемых на борту летательных аппаратов, эти размеры ограничиваются линейными размерами носителей. Попытка уменьшить угол $\Delta\alpha$ привела к созданию вдольфюзеляжных антенн. Длительное время казалось, что этим исчерпываются все возможности для бортовых радиолокационных станций.

Прорыв произошел в начале шестидесятых годов, когда впервые было обращено внимание на то, что обработка сигнала в антенне по существу сводится к сложению сигналов от различных ее участков с учетом соответствующего набегу фазы, вызванного особенностями геометрии антенной конструкции. Это привело к мысли, что такую обработку можно сделать искусственно. С этой целью необходимо последовательно в разных точках пространства произвести измерение амплитуды и фазы напряженности электрического поля, запомнить эти значения, а затем специальным образом их сложить. Реализация этой идеи состоит в том, что упомянутые выше измерения производятся в процессе полета. Это дает возможность искусственно создать антенну, размеры которой определяются расстоянием между первым и последним замерами, то есть в принципе такая антенна может быть практически безграничной.

Здесь мы не будем говорить о тех теоретических и инженерных трудностях, с которыми сопряжена реализация этой идеи. Главное - это то, что названные трудности были успешно преодолены, что привело к созданию принципиально нового класса антенн - антенн с синтезированной апертурой. Радиолокационные станции, работающие с такими антеннами, получили название РЛС с синтезированной апертурой (РСА). В современных РСА удастся получить отношение d/λ , исчисляемое несколькими сотнями, а в отдельных случаях даже тысячами. Использование РСА привело к такому сокращению элемента разрешения, что радиолокационное изображение стало приближаться к фотографическому (в фотографии "точка переводится в точку", в радиолокации "элемент разрешения переводится в точку"). Сегодняшний уровень РСА - это многочастотная РЛС с управляемой поляризацией излучаемой волны, работающая в реальном масштабе времени.

9. Какие сигналы воздействуют на вход РЛС

Перейдем теперь к рассмотрению процессов, имеющих место после прохождения принятым сигналом антенных трактов и поступлением его на вход радиоприемного устройства РЛС.

Поскольку в радиолокации приходится иметь дело с очень малыми сигналами, интенсивность которых соизмерима с интенсивностью собственных шумов самого радиоприемного устройства РЛС (часто полезный сигнал даже много меньше шумового сигнала), необходимо учитывать, что на вход радиолокационного приемника постоянно воздействует шумовой сигнал, который, как это следует из общей теории, также имеет вид квазигармонического колебания, определяемого равенством (1). При этом его амплитуда и фаза являются случайными функциями времени.

Таким образом, во всех случаях, связанных с наличием или отсутствием цели, и даже в случаях наблюдения свободного пространства, на вход радиоприемного устройства РЛС всегда воздействует некоторое квазигармоническое колебание вида (1) со случайными амплитудой и фазой.

Представим сигнал, действующий на вход РЛС, в виде двух слагаемых, первое из которых относится к обнаруживаемому сигналу, а второе ко всем остальным, в том числе и шумовому сигналу:

$$U_{\text{вх}}(t) = nA_1(t)\cos(2\pi f_0 t + j_1(t)) + AS(t)\cos(2\pi f_0 t + jS(t)).$$

В равенство (4) введен параметр n , который в случае наличия цели принимается равным 1 ($n=1$), а в случае ее отсутствия - равным нулю ($n=0$).

Равенство (4) позволяет формализовать основную задачу радиолокации и сформулировать ее следующим образом. В уравнении (4) требуется определить значение параметра n и, если $n=1$, определить характер изменения функций $A_1(t)$ и $j_1(t)$. При этом измерению поддается только функция $U_{\text{вх}}(t)$. Известными могут считаться некоторые характеристики обнаруживаемой цели, влияющие на характер изменения во времени функций $A_1(t)$ и $j_1(t)$. Слагаемое, связанное с шумовой частью входного сигнала, принципиально неизвестно, так как носит случайный характер, а поэтому функция $U_{\text{вх}}(t)$ также является случайной функцией времени.

Выше уже говорилось, что всякое нагретое тело, в том числе тела, обладающие конечной электрической проводимостью, например, электрические проводники и, в частности, резисторы, являются источниками тока $I_{\text{ш}}(t)$, порождаемого хаотическим движением электронов, что приводит к возникновению случайного напряжения на концах резистора сопротивления R , равного $U_{\text{ш}}(t) = I_{\text{ш}}(t)R$. Это напряжение носит название шумового напряжения, а соответствующий ток – шумового тока.

Здесь важно подчеркнуть два момента. Во-первых, абсолютное значение этого напряжения на сопротивление в 1 Ом очень мало, оно имеет значение порядка 10^{-14} - 10^{-12} В. Второй момент состоит в том, что функция $U_{\text{ш}}(t)$ имеет очень широкий спектр частот, который в подавляющем большинстве задач радиотехники принято считать равномерным в пределах полосы пропускания конкретных радиотехнических устройств. Такой шум носит название «белого шума», в отличие от иногда используемого шума с неравномерным спектром, который называется «серым шумом».

Основной характеристикой белого шума является спектральная мощность шума N_0 , т.е. интенсивность шума приходящаяся на 1 Гц, ее численное значение равно $N_0=4 \cdot 10^{-21}$ [Вт/Гц=Вт/с⁻¹=Дж] и для средних температур ($T_0=300$ К) имеем $N_0=4 \cdot 10^{-21}$ Дж. Как видно, спектральная плотность шума определяется абсолютной температурой T_0 резистора и постоянной Больцмана k , значение которой видно из приведенной формулы. Полная мощность шума («шумового источника»), очевидно определится формулой $P_{ш} = N_0 \Delta f$ Вт.

Широкополосность шума приводит к тому, что к *каждой* принимаемой синусоидальной составляющей добавляется шумовая синусоидальная составляющая *той же частоты*, в результате по всем цепям и устройствам приемного радиотехнического устройства будут циркулировать токи той же частоты, т.е. каждая суммарная спектральная составляющая будет содержать неразличимую между собой информацию о наблюдаемом и шумовом сигналах, т.е.

$$I_{сигн} + I_{шум} = \alpha I_{0c} \sin(\omega_0 t + \varphi_c) + I_{0ш} \sin(\omega_0 t + \varphi_{ш}) = \\ = \sqrt{\alpha^2 I_{0c}^2 + I_{0ш}^2 + 2\alpha I_{0c} I_{0ш} \cos(\varphi_c - \varphi_{ш})} \sin(\omega_0 t + \delta) ,$$

где $\delta = \arctg \frac{\alpha I_{0c} \sin \varphi_c + I_{0ш} \sin \varphi_{ш}}{\alpha I_{0c} \cos \varphi_c + I_{0ш} \cos \varphi_{ш}}$, при этом

$\alpha=0$ при отсутствии наблюдаемого сигнала (случай чистого шума),

$\alpha=1$ при наличии наблюдаемого сигнала (случай смеси наблюдаемого сигнала и чистого шума)

Именно это составляет одну из главных проблем радиотехники и радиолокации, в частности, ибо мощность сигнала, отраженного от цели, по своей величине имеет тот же порядок и даже меньше, что и мощность собственных шумов приемника. Решению этой проблемы, носящей название «выделение сигналов на фоне шума», посвящено большое число специальных монографий, десятки, если не сотни научных статей, а разработанные на их основе технические системы потрясают воображение. Чтобы представить, о

каких ничтожных мощностях идет речь, оценим мощность сигнала, посланного американской станцией *New Horizons* с окрестностей планеты Плутон, расстояние которого до Земли составляет порядка $R \sim 5 \text{ млрд км} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}$. Мощность передатчика на станции составляла всего $P = 60 \text{ Вт}$. Таким образом, плотность потока мощности сигнала $P_{зем}$ в окрестности Земли можно оценить, как $P_{зем} \sim P/R^2 = 60 \cdot 0,04 \cdot 10^{-24} = 2,4 \cdot 10^{-24} \text{ Вт/м}^2$. Если считать эффективную площадь антенны порядка $S_{эфф} \sim 1000$, то мощность искомого сигнала на входе приемника составит $P_{зем} \cdot S_{эфф} \sim 10^{-21} \text{ Вт}$. В предположении, что прием сигнала происходит в полосе частот порядка $\Delta f \sim 1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$ мощность шумов на входе приемника будет равна $P_{шум} = N_0 \cdot \Delta f = 4 \cdot 10^{-21} \cdot 10^6 = 4 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$, т.е. в миллионы раз больше, чем сигнал, приходящий со станции. И такой сигнал успешно выделяется! На снимках прекрасно виден рельеф планеты и даже большие камни. Разве это не чудо!

10. Как выделять полезный сигнал на фоне шума

Рассмотрим, простейший принцип решения проблемы выделения слабого сигнала на фоне шумов, существенно превышающих этот сигнал.

Пусть напряжение полезного сигнала на входе приемного устройства имеет вид $U_{сигн}(t) = U_{0c} \sin(\omega_0 t + \varphi_{0c})$. Временную зависимость шума обозначим, как $n_{шум}(t) = N_{0ш}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_{0ш}(t))$. Коренное отличие этих двух выражений состоит в том, что спустя время $T = 2\pi/\omega$, величина $U_{сигн}$ повторит свое значение, т.е. $U_{сигн}(t) = U_{сигн}(t+T) = U_{сигн}(t+2T) = \dots = U_{сигн}(t+mT)$, где $m=1, 2, \dots$. Что касается шумового сигнала, то в силу случайного хаотического характера изменения $N_{0ш}(t)$ и $\varphi_{0ш}(t)$, такой зависимости нет, т.е. $n_{шум}(t) \neq n_{шум}(t+T) \neq n_{шум}(t+2T) \neq \dots \neq n_{шум}(t+mT)$.

Таким образом, осуществляя задержку принимаемого сигнала на $T, 2T, 3T, \dots, mT$ и осуществляя сложение задержанных сигналов, через время mT получим суммарный сигнал с амплитудой, увеличенной в m раз, т.е. вместо U_{0c} амплитуда станет равной mU_{0c} . Происходит, так называемый процесс

накопления сигнала. Что касается шума, то в силу случайного характера $\varphi_{0ш}(t)$ такого «идеального» сложения не произойдет и суммарный сигнал будет колебаться около нулевого значения. «Стоимость» такого способа выделения сигнала – это время обработки, в течение которого характеристики полезного сигнала должны быть стабильны, что накладывает серьезные требования на стабильность генератора передатчика, т.е. частота сигнала не должна «плавать».

Знание всех характеристик обнаруживаемого сигнала дает возможность использовать другой метод его выделения на фоне собственных шумов приемника. Знание сигнала $S(t)$ означает знание его спектра $G(f)$ и начальных фаз $\varphi_0(f)$ каждой из его спектральной составляющей. В рассмотренном ранее методе выигрыш реализовывался за счет более эффективного накопления энергии сигнала по сравнению с такой же операцией в отношении шума, что по истечении времени наблюдения приводило к заметному выигрышу в отношении энергии сигнала к энергии шума или, как принято говорить, к увеличению отношения/шум.

Такой же «сбор» энергии сигнала можно осуществить за счет специальных характеристик приемного устройства.

Достаточно очевидно, что приемник, прежде всего, должен обеспечивать прием всех спектральных составляющих сигнала. Это значит, что, так называемая, амплитудная характеристика приемника $A(f)$, должна в точности совпадать со спектром сигнала, т.е. $A(f)=G(f)$.

Очевидно, что энергия сигнала рассредоточена по его спектральным составляющим и определяется квадратами их амплитуд. Такой же эффект можно получить, если добиться того, чтобы максимумы каждой из гармоник совпали бы во времени, что эквивалентно тому, чтобы в каждой из гармоник сдвинуть фазу на величину $(-\varphi_0(f))$. Естественно, это должно произойти в момент окончания наблюдаемого сигнала.

Такой способ выделения сигнала на фоне шума называется согласованной (оптимальной) фильтрацией, а само устройство носит название согласованного (оптимального) фильтра.

11. Как принимать решение о наличии радиолокационной цели

Из сказанного ясно, что строго решить поставленную задачу, то есть решить уравнение (4), принципиально невозможно, тем более по результатам какого-либо разового измерения в какой-то фиксированный момент времени $t=t_1$.

Уравнение (4) позволяет сделать еще ряд принципиальных выводов и заключений.

Прежде всего, отметим, что безошибочно ответить на вопрос, чему равен параметр n , то есть ответить на вопрос, есть или нет в разрешаемом элементе обнаруживаемая цель, *принципиально невозможно*. Этот ответ может носить только характер предположения, количественными оценками которого могут выступать какие-то вероятности достоверности этого предположения. Следовательно, адекватным математическим аппаратом для задач обнаружения, да и большинства радиолокационных задач, могут выступать методы математической статистики и теории вероятностей.

Второй вывод, вытекающий из рассмотрения уравнения (4), состоит в том, что достоверность заключения о значении параметра n можно увеличить, увеличивая время наблюдения, то есть увеличивая отрезок функции $U_{\text{вх}}(t)$, подвергающийся анализу.

Наконец еще один вывод, который можно сделать, анализируя с общих позиций уравнение (4), состоит в том, что различие в виде функций $U_{\text{вх}}(t)$ при наличии или отсутствии цели заключается в различии статистических законов, которым подчиняются случайные функции $U_{\text{вх}}(t)$.

Попытаемся выяснить, какие принципы необходимо заложить в процесс обработки принятого сигнала, чтобы совершаемые при этом ошибки в ответе на вопрос о наличии или отсутствии цели были каким-то образом минимизированы, а для этого попытаемся разобраться в тех типах ошибок,

которые неизбежно возникают в процессе принятия решения о наличии или отсутствии цели.

12. Какие ошибки возникают при принятии решения

Чтобы разобраться в возникающих типах ошибок, рассмотрим простую ситуацию, когда фоновые отражения отсутствуют или ими просто можно пренебречь.

Пусть радиоприемное устройство РЛС производит какую-то обработку принятого сигнала. В этом случае на выходе этого приемника сформируется сигнал, являющийся некоторой функцией от аддитивной смеси принятого сигнала и собственного шума приемного устройства. Это дает возможность выходное напряжение представить в следующем виде:

$$U_o U_t(t) = f(U_n(t) + n U_s(t)).$$

В этой формуле $U_n(t)$ - собственный шум радиоприемного устройства, всегда присутствующий в смеси и всегда воздействующий на вход этого устройства; $U_s(t)$ - сигнал, вызванный отражением от обнаруживаемой цели, который присутствует в названной смеси только при наличии цели ($n=1$) в наблюдаемом элементе разрешения.

Какова бы ни была функция $f(z)$, во всех случаях решение о наличии или отсутствии цели будет приниматься в какой-то фиксированный момент времени $t=t_1$, то есть в результате некоторого разового измерения. Дать же строгий ответ на вопрос, чему равен коэффициент n , принципиальной возможности нет. Как же быть в этом случае? Каково должно быть решающее правило? Как ни странно, ответ на второй вопрос независимо от способа обработки принимаемого сигнала (вида функции $f(z)$) достаточно прост и очевиден. Единственным возможным решающим правилом может выступать только пороговое правило. Оно сводится к тому, что если входное напряжение $U_{вх}(t)$ больше некоторого значения (порогового значения) U_0 , то следует считать, что цель есть; если же имеет место обратная ситуация, то следует признать, что цели нет.

Разобранная ситуация позволяет увидеть, что процедура принятия решения при пороговом правиле, то есть процесс обнаружения, сопровождается ошибками двух типов. Рассмотрим эти ошибки.

При радиолокационном наблюдении возможны две ситуации: первая - в элементе разрешения находится цель (ситуация A), вторая - в элементе разрешения цели нет (ситуация B). В обоих случаях наблюдатель может принять одно из двух решений: либо цель есть (решение 1), либо ее нет (решение 2). Таким образом, возможны четыре варианта, которые условно можно обозначить так: A_1, A_2, B_1, B_2 . При этом два решения - A_1 и B_2 - являются истинными, а два других - A_2 и B_1 - ложными.

Итак, мы имеем дело с двумя типами ошибочных решений: 1) Ложная тревога, когда при отсутствии в элементе разрешения цели принимается решение о ее наличии (вариант B_1 ; соответствующая вероятность называется вероятностью ложной тревоги, она обычно обозначается буквой F). 2) Пропуск цели, когда при наличии цели принимается решение о ее отсутствии (вариант A_2 ; соответствующая вероятность называется вероятностью пропуска цели, она обычно обозначается разностью $1-D$).

Два других решения являются истинными. 1) Правильное обнаружение, когда при наличии цели принимается решение о ее наличии (вариант A_1 ; соответствующая вероятность называется вероятностью правильного обнаружения, она обычно обозначается буквой D). 2) Правильное необнаружение, когда при отсутствии цели принимается решение об ее отсутствии (вариант B_2 ; соответствующая вероятность называется вероятностью правильного необнаружения, она обычно обозначается разностью $1-F$).

Какие бы задачи и цели ни стояли перед РЛС, во всех случаях желательно как можно реже принимать ошибочные решения. Однако при пороговом решающем правиле в распоряжении наблюдателя есть только одна-единственная возможность "воздействия" на ситуацию: изменять величину

порога U_0 . Рассмотрим, как величина U_0 влияет на вероятности ложных решений, перечисленных выше.

Рост порогового значения U_0 естественно приводит к уменьшению вероятности ложной тревоги, но влечет за собой рост вероятности пропуска цели. Наоборот, уменьшение порогового значения U_0 приводит к уменьшению вероятности пропуска цели, но влечет за собой рост вероятности ложной тревоги.

13. Когда и по каким критериям принимать решение

От чего же зависит выбор порога и кем, и чем он определяется? Уровень вероятностей ложных решений определяется исключительно потребителем радиолокационной информации, исходя из целевого назначения РЛС. В свою очередь, вероятности ложных решений определяют пороговое значение. Таким образом, в конечном счете уровень порога определяет сам потребитель радиолокационной информации. Рассмотрим теперь критерии, которыми руководствуется потребитель радиолокационной информации.

Наличие двух независимых вероятностей ложных решений открывает путь к бесконечному количеству всевозможных критериев оценки эффективности обработки сигналов радиоприемным устройством РЛС, то есть оценки эффективности алгоритма обработки $f(z)$ в формуле (4). В радиолокации принят критерий Неймана-Пирсона, в соответствии с которым при фиксированной вероятности ложной тревоги оценивается вероятность правильного обнаружения. Задача обработки радиолокационного сигнала сводится поэтому к выбору такой функции $f(z)$, при которой в рамках названного критерия максимизируется вероятность правильного обнаружения. Радиоприемное устройство, обеспечивающее максимально возможную вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги, называется оптимальным по критерию Неймана-Пирсона.

В предыдущих рассуждениях открытым остался вопрос о выборе момента времени t_1 принятия решения. В рассматриваемых задачах есть два

характерных момента. Первый из них t_s определяется моментом, когда отраженный от цели сигнал начал воздействовать на вход радиоприемного устройства, и второй момент t_f - момент окончания этого воздействия.

Ясно, что принятие решения ранее времени t_f , то есть при $t=t_1 < t_f$, неразумно, так как при этом теряется информация о сигнале за промежуток времени от t_1 до t_f . Принятие решения после момента времени t_f также неразумно, так как обработка принимаемого сигнала в отсутствие полезного сигнала не приведет к увеличению информации о ситуации. Таким образом, моментом принятия решения должно выступать время t_f , то есть $t_1=t_f$.

Следующий вопрос заключается в выработке каких-то подходов к определению алгоритма $f(z)$.

Ясно, что при пороговом правиле линейным алгоритм $f(z)$ быть никак не может. Требование его нелинейности выводит на квадратичную обработку принятого сигнала, то есть на уровень энергетических понятий. К такому же выводу можно прийти, если рассуждать, опираясь на чисто физические представления.

Таким образом, обработка принимаемого сигнала должна сводиться к построению такого радиоприемного устройства, которое будет накапливать энергию полезного сигнала за время наблюдения в период времени с $t=t_s$ до $t=t_f$. Естественно, что при этом будет накапливаться и энергия шумового сигнала, а поэтому синтезируемый алгоритм должен обеспечивать определенную избирательность в этой процедуре, обеспечивая упреждающую роль первого из названных накоплений. Физической основой возможности такой избирательности могут выступать только какие-то априорные знания об исследуемом сигнале.

Из сказанного вытекает фундаментальный вывод, что любой сколь угодно малый по отношению к собственным шумам радиоприемного устройства сигнал может быть выделен из его смеси с этим шумом при достаточно длительном наблюдении за процессом. Подтверждением такого глобального вывода является успешное радиолокационное зондирование

Солнца, Юпитера, Венеры, Меркурия и Марса, осуществленное российскими и американскими учеными и специалистами. Отраженный сигнал был в тысячи, если не в миллионы раз меньше собственных шумов радиоприемных устройств РЛС.

Построение алгоритмов обработки радиолокационных сигналов напрямую связано со знанием статистических закономерностей смеси полезного сигнала, фоновых сигналов и собственного шума радиоприемного устройства. Чем более полными и достоверными знаниями располагает исследователь, тем эффективнее работает алгоритм, тем меньшими можно сделать вероятности ложных решений. Именно поэтому так много внимания уделяется разработке различных теоретических моделей и экспериментальным исследованиям по определению этих закономерностей.

14. Уравнение дальности

Узловой вопрос радиолокации состоит в том, на каком расстоянии от радиолокационной станции можно обнаруживать цель, отчего это зависит и насколько достоверен этот показатель.

Рассмотрим эту задачу подробнее.

Пусть мощность передатчика радиолокационной станции (РЛС) равна P_{Σ} , излучение зондирующего сигнала (безразлично какой формы импульсной или непрерывной) осуществляется на частоте ω .

Очевидно, что плотность потока энергии Π_{Σ} на расстоянии R от передатчика будет равна $\Pi_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi R^2}$.

В радиолокации используются антенны, создающие неравномерное распределение поля в пространстве, которые обеспечивают наиболее высокую концентрации энергии излучения в заданном направлении. Степень этой концентрации в направлении, определяемом сферическими координатами (θ, φ) , по отношению к средней плотности энергии по всем направлениям называется коэффициентом направленного действия (КНД) антенны – $D(\theta, \varphi)$.

Если учесть потери энергии, возникающие вследствие наведения тока в металлических конструкциях антенны, то следует говорить о КПД антенны - η , показывающем, какая доля мощности приходится на мощность излучаемого поля. В этом случае используется понятие коэффициента усиления (КУ) антенны $G(\theta, \varphi)$ в заданном направлении.

Таким образом, очевидно, что плотность потока энергии на расстоянии R от передающей антенны РЛС в направлении (θ, φ) будет равна

$$P_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma} \cdot \eta D(\theta, \varphi)}{4\pi R^2} = \frac{P_{\Sigma} G(\theta, \varphi)}{4\pi R^2}.$$

Очень часто, когда говорят о КНД и КУ антенны, имеют в виду, как правило, их максимальные значения, которые соотносят с нулевыми значениями сферических углов, т.е. $\theta=\varphi=0$, а поэтому в дальнейшем будем при необходимости просто писать D и G . Что касается коэффициента полезного действия η , то для антенн, используемых в радиолокации он заметно больше 0,8-0,85.

Электромагнитная волна, достигнув цели, наводит на ней электрические токи, которые будут являться источниками вторичного поля, распространяющегося во всех направлениях. Тот поток энергии, который распространяется в направлении на приемную антенну РЛС, как уже говорилось раньше, носит названия отраженной волны, а потоки энергии в остальных направлениях, принято называть рассеянным полем.

Ясно, что значение мощности отраженного сигнала $P_{отр}$, будет прямо пропорциональна плотности потока энергии облучающей волны P_{Σ} , при этом коэффициент пропорциональности должен иметь размерность площади (m^2) и зависеть от сферических углов, под которыми наблюдается цель (θ, φ) , и углами (θ_1, φ_1) направления на приемную антенну РЛС, если ее расположение не совпадает с местом нахождения передающей антенны (случай, так называемой, двухпозиционной радиолокации). Этот коэффициент носит название эффективной площади рассеяния (ЭПР), иногда его называют

эффективной отражающей поверхностью (ЭОП), эффективным поперечником рассеяния (ЭПР). Будем обозначать его буквой $\sigma(\theta, \varphi; \theta_1, \varphi_2)$. В дальнейшем речь будет идти об однопозиционной радиолокации, когда передача и прием радиолокационных сигналов осуществляется из одного и того же места при помощи одной и той же антенны), а поэтому в качестве ЭПР будем просто писать σ .

Итак, в направлении на приемную антенну излучается сигнал мощностью

$$P_{omp} = \sigma P_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma} G \sigma}{4\pi R^2} P_{omp},$$

плотность потока мощности которого непосредственно у приемной антенны будет иметь следующее значение:

$$P_{omp} = \frac{P_{omp}}{4\pi R^2} = \frac{P_{\Sigma} G \sigma}{(4\pi R^2)^2}.$$

Рассуждения, аналогичные проведенные выше, приведут нас к выводу, что сигнал на выходе приемной антенны, т.е. на входе приемного устройства РЛС, сигнал будет пропорционален величине P_{omp} с коэффициентом пропорциональности, имеющим размерность площадь (m^2). В качестве такого коэффициента выступает эффективная площадь приемной антенны $S_{эфф}$, связанная с коэффициентом усиления G антенны при помощи соотношения:

$$G = \frac{4\pi S_{эфф}}{\lambda^2}.$$

Таким образом, на входе приемника РЛС сформируется сигнал мощностью

$$P_{вх} = \frac{P_{\Sigma} G S_{эфф} \sigma}{(4\pi R^2)^2}.$$

Все проведенные выше рассуждения никак не были связаны с основным фактором, влияющим на дальность обнаружения радиолокационных целей, - с собственными шумами приемного устройства, накладывающими беспощадные

ограничения на возможность выделения принятого сигнала на фоне постоянно присутствующего шумового сигнала.

Основной характеристикой приемного устройства, «гарантирующей» возможность различения принимаемых сигналов и собственного шума приемника, является, так называемая, «чувствительность» приемника $-P_{\min}$. Смысл этого показателя состоит в том, что он определяет минимальное значение принимаемого сигнала, который может быть зафиксирован на выходе приемного устройства.

Здесь следует обратить особое внимание, что говорить о гарантированном обнаружении можно только условно, понимая под этим факт обнаружения полезного сигнала с некоторой заданной вероятностью правильного обнаружения.

Итак, условие обнаружение цели сводится к выполнению неравенства $P_{\text{ex}} \geq P_{\min}$, а значение максимальной дальности обнаружения $R_{\max}$ находится из равенства $P_{\text{ex}} = P_{\min}$, что с учетом ранее полученных соотношений выводит на искомое выражение:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\Sigma}}{P_{\min}} \cdot \frac{GS_{\text{эфф}}\sigma}{(4\pi)^2}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\Sigma}}{P_{\min}} \cdot \frac{G^2\lambda\sigma}{(4\pi)^3}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\Sigma}}{P_{\min}} \cdot \frac{S_{\text{эфф}}^2\sigma}{4\pi\lambda}}.$$

В приведенных соотношениях использована формула, связывающая КНД и эффективную площадь антенны.

Найденное по этим формулам значение максимальной дальности говорит о максимальной дальности, на которой полезный сигнал может быть выделен на фоне собственных шумов приемника на его выходе с той вероятностью, с которой определена чувствительность этого приемника.

Полученные соотношения относились к ситуации, когда радиолокационная станция и обнаруживаемая цель находились в свободном пространстве, т.е. в среде без потерь. Однако атмосфера, а точнее влага и различные гидрометеоры, содержащиеся в ней, оказывают самое

существенное влияние на максимальную дальность, на которой может быть обнаружена радиолокационная цель.

Основной характеристикой затухания энергии в атмосфере выступает коэффициент поглощения α , а закон изменения мощности носит экспоненциальный характер. Иными словами, мощность изменяется по закону $P(R) \sim \frac{P_0}{R} e^{-\alpha R}$, а поэтому уравнение для определения максимальной дальности примет вид:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{P_{\min}} \cdot \frac{GS_{\text{эфф}}\sigma}{(4\pi)^2} e^{-\alpha R_{\max}}}.$$

Как видно, речь идет о трансцендентном уравнении, решаемом графически.

Одна из особенностей, полученных соотношений, состоит в слабой зависимости максимальной дальности обнаружения радиолокационных целей от мощности передатчика. Чтобы увеличить максимальную дальность в 2 раза, требуется увеличить мощность в $2^4=16$ (!) раз.

Существенное влияние на дальность обнаружения оказывает земная поверхность, что особенно сильно себя проявляет в тех случаях, когда осуществляется обнаружение низко летящих целей.

Причина этого состоит в том, что помимо прямого луча на цель попадает луч, отраженный от поверхности земли, который оказывается практически противофазным по отношению к прямому лучу.

Ниже без вывода приводится формула для максимальной дальности для этого случая:

$$R_{\max} = 8 \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{P_{\min}} \cdot \frac{4\pi G^2 \sigma (Hh)^4}{\lambda^2}}.$$

В приведенной формуле фигурируют высота h передающей антенны и высота H над поверхностью Земли обнаруживаемой цели.

Как видно, зависимость максимальной дальности от мощности передатчика оказывается еще более слабой. Теперь, чтобы увеличить дальность в 2 раза, мощность надо увеличить в $2^8=256$ (!) раз.

15. От чего зависит точность измерения и как ее повысить

Следующей важной проблемой, стоящей перед радиолокацией, является обеспечение точности измерения основных параметров и характеристик отраженных радиосигналов, позволяющих определять пространственные координаты и скорость радиолокационной цели, а также расстояние до этой цели.

Обнаружение радиолокационных целей, как уже говорилось, зависит исключительно от энергии отраженного сигнала и не зависит от его вида и формы. Точность же измерения параметров и характеристик принимаемых сигналов зависит не только от их энергии, но и от формы зондирующего сигнала. Из общей теории следует, что для того чтобы обеспечить высокоточное определение дальности и скорости радиолокационной цели, излучаемый сигнал должен иметь как можно большую длительность во времени и иметь как можно более широкий спектр. (Последнее означает требование сложности формы сигнала, его как бы наибольшее отличие от самого простого радиолокационного сигнала, каковым является обычная синусоида.) Таким требованиям удовлетворяют так называемые сложные сигналы, к которым относятся линейно-частотно-модулированные сигналы, сигналы с фазовой манипуляцией, шумоподобные сигналы и ряд других. Формированию и применению таких сигналов посвящены специальные разделы радиолокации. Невозможность изложения всех проблем радиолокации в одной статье не позволяет более подробно остановиться на этом вопросе. Следует обратить внимание на парадоксальный вывод, что наилучшим по критерию точности одновременного измерения дальности до цели и ее скорости является идеальный шумовой сигнал.

16. Какие неклассические виды радиолокации существуют

В заключительной части очень кратко остановимся на некоторых неклассических видах радиолокации.

Ранее уже упоминалось о нелинейной радиолокации. Несмотря на весьма слабые отраженные сигналы, которые имеют место в этом случае, их накопление в радиоприемном устройстве за приемлемое время делает это направление радиолокации достаточно привлекательным, а зачастую единственным средством обнаружения малоподвижных, слабоконтрастных целей, обладающих соответствующим эффектом, на фоне мощного отражения от подстилающих покровов.

В последние годы большой интерес и заметное применение находит двухпозиционная радиолокация, при которой облучение цели осуществляется из одного пункта, а прием отраженных радиоволн проводится в других пунктах. Такой способ решения радиолокационных задач позволяет обеспечивать более точную навигационную привязку к исследуемому объекту. Иллюстрацией двухпозиционной радиолокации может служить наша повседневная жизнь, когда источником освещения служит Солнце, мы же воспринимаем рассеянный окружающими предметами солнечный свет.

В какой-то степени к двухпозиционной радиолокации можно отнести так называемую вторичную радиолокацию, нашедшую широкое применение в гражданской и военной авиации. Ее суть сводится к тому, что наземный радиолокатор, облучая летательный аппарат, включает бортовую РЛС, которая передает специальную информацию о полете летательного аппарата и о состоянии некоторых его систем.

Как известно, всякое нагретое тело излучает электромагнитные волны различных частот. Максимум интенсивности этого излучения при температурах порядка 300 - 350 К приходится на инфракрасный диапазон волн. Существуют и довольно успешно функционируют РЛС, осуществляющие прием этого излучения. Направление, связанное с использованием этого диапазона носит название ИК-радиолокации. Достоинство ИК-радиолокации состоит в скрытности функционирования РЛС,

в трудностях постановки помех ее действию, неэффективности маскировки наблюдаемых объектов. Недостатки связаны с невозможностью осуществления селекции по дальности, а также с сильным влиянием состояния атмосферы. Свободными от последнего недостатка оказались РЛС, работающие по тому же принципу, но в сантиметровом и частично в миллиметровом диапазонах волн. Сам сигнал здесь существенно меньше, чем в инфракрасном диапазоне, однако это не является принципиальным препятствием на пути использования таких РЛС. Это направление носит название пассивной тепловой радиолокации или микроволновой радиометрии.

Развитие лазерной техники привело к созданию нового направления - оптической радиолокации.

17. Где сегодня не обойтись без радиолокации

Некоторое представление об областях применения РЛС может дать приводимый ниже перечень.

1. Сельское и лесное хозяйство. Исследование плотности растительного покрова, распределение лесных массивов, лугов и полей, определение вида почв, их температуры и влажности, контроль за состоянием ирригационных систем, обнаружение пожаров.

2. Геофизика и география. Определение структуры землепользования, распределение и состояние транспорта и систем связи, развитие систем переработки природных ресурсов, топография и геоморфология, определение состава пород и их структуры, стратиграфия осадочных пород, поиск минеральных месторождений, отработка техники разведки полезных ископаемых.

3. Гидрология. Исследование процессов испарения влаги, распределение и инфильтрация осадков, изучение стока грунтовых вод и загрязнения водных поверхностей, определение характера снегового и ледового покрова, наблюдение за водным режимом главных рек.

4. Океанография. Определение рельефа волнующейся поверхности морей и океанов, картографирование береговой линии, наблюдение за биологическими явлениями, проведение ледовой разведки.

5. Военное дело, гражданская авиация и космические исследования. Метеорологическое обеспечение полетов, управление воздушным движением, обеспечение ближней и дальней радионавигации, радиолокационное обеспечение посадки воздушных судов и космических аппаратов, обеспечение дальнего и ближнего обнаружения воздушных целей и наведения на них перехватчиков, обеспечение перехвата воздушных целей и прицеливания, панорамный обзор поверхности, распознавание государственной принадлежности летательных аппаратов, обеспечение радиолокационного сопровождения воздушных и наземных объектов и т.д.

Заключение

Мы лишь слегка заглянули в удивительный мир, который дала нам радиолокация. Здесь есть место исключительно сложной и глубокой теории, уникальным экспериментам, воистину волшебным техническим решениям и прикладным применениям.

ЧАСТЬ 2

1. Распространение радиоволн свободном пространстве.

1.1. Среда без потерь

1.2. Среда с потерями

1.3. Дальность прямой видимости

2. Области распространения радиоволн

2.1. Тропосфера

2.2. Стратосфера

2.3. Ионосфера.

3. Особенности распространения радиоволн в тропосфере

4. Особенности распространения радиоволн в ионосфере

5. Области пространства, существенные при распространении радиоволн

6. Классификация радиоволн

7. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

1. Распространение радиоволны в свободном пространстве.

1.1. Среда без потерь

Одно из основных направлений практического использования электромагнитных явлений — это дистанционная передача и прием информации. Именно эти задачи решают радиосвязь, радиолокация и радионавигация.

Общая схема процесса информационного обмена схематически показана на рис.1.



Рис.1. Схема информационного обмена при помощи радиоволн

Распространения радиоволн может происходить в различных (с точки зрения электрофизических и геометрических характеристик и свойств) средах – атмосфере, почве, ионосфере, водной среде, лесных массивах и т.д. При этом в каждой из этих сред характер распространения радиоволн имеет свои особенности.

С точки зрения электродинамики любая точка пространства (x_0, y_0, z_0) , где протекают электромагнитные процессы, характеризуется, если не считать магнитной проницаемости μ , двумя числами: безразмерным числом $\varepsilon_{abc}(x_0, y_0, z_0)$ – диэлектрической проницаемостью и $\sigma(x_0, y_0, z_0)$ – электрической проводимостью, имеющей размерность $Cм/м$. Эти характеристики, в свою очередь, зависят как от физических характеристик среды – температуры, влажности, солености, концентрации ионов, электронов и др., так и от частоты, на которой производится их измерение.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{abc}(x_0, y_0, z_0)$ представляет собой произведение относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{отн}(x_0, y_0, z_0)$ на электрическую постоянную $\varepsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, т.е. $\varepsilon_{abc}(x_0, y_0, z_0) = \varepsilon_0 \varepsilon_{отн}(x_0, y_0, z_0)$. В дальнейшем в большинстве приводимых формул будет фигурировать $\varepsilon_{отн}(x_0, y_0, z_0)$, вместо которой будем просто писать ε .

Для вакуума $\varepsilon = 1$ и для подавляющего большинства естественных сред $\varepsilon > 1$. Однако в средах, где присутствуют электрически заряженные частицы, это неравенство нарушается, и в зависимости от концентрации таких частиц ε становится меньше 1, равной 0 и даже отрицательной величиной.

Достаточно часто (как правило, в средах с малыми потерями) вместо диэлектрической проницаемости ε используют однозначно связанный с ней – коэффициент преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$.

Основными характеристиками радиоволны, ее описывающими, являются вектора электрической **E** (электрический вектор) и магнитной **H** (магнитный вектор) напряженностей. В рамках последующего, поскольку рассмотрение протекающих процессов происходит достаточно далеко от источников

электромагнитного излучения, то длины векторов **E** и **H** связаны между собой соотношением $E=120\pi H/\sqrt{\varepsilon}$.

Найдем напряженность поля E радиоволны, создаваемого на расстоянии R от точечного источника электромагнитного излучения Q мощностью P_{Σ} .

Проведем сферу радиуса R с центром в месте расположения этого источника. Очевидно, что плотность потока мощности Π на поверхности

сферы будет равна $\Pi = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\text{сферы}}} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi R^2}$. Из электродинамики известно, что, с

другой стороны, эта величина равна длине, так называемого вектора Умова-Пойнтинга, который в данном случае представляет собой произведение длин

векторов **E** и **H**, т.е. $\Pi = E \cdot H = \frac{E^2}{120\pi}$, откуда элементарно следует

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{\Sigma}}}{R}. \quad (1)$$

Если допустить, что антенна обладает направленными свойствами, то это можно легко учесть, введя в формулу некий параметр, учитывающий эти свойства. Такой параметр G носит название коэффициента направленного действия антенны— КНД, показывающий отношение концентрации энергии, излучаемой в заданном направлении, к средней энергии, излучаемой по всем направлениям.

С учетом сказанного формула (1) примет вид $E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{\Sigma} D}}{R}$.

Это соотношение носит название формулы идеальной радиопередачи.

Полученные соотношения по существу решают задачу распространения радиоволн в однородной среде (ε и μ постоянны, $\sigma=0$), к каковым можно отнести: космос, атмосферу. С этой целью запишем мгновенное значение напряженности электрического поля в точке, находящейся на расстоянии x от источника электромагнитной волны частоты ω :

$$E = E_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right] = E_0 \sin \left(\omega t - \frac{\omega}{c} x + \varphi_0 \right) = E_0 \sin(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (2),$$

где E_0 – амплитуда, φ_0 – начальная фаза, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Известно, что действующее значение напряженности E , определенное формулой (1), связано с ее амплитудным значением E_m при помощи соотношения $E_m = \sqrt{2}E$. Таким образом, формула (2) примет вид:

$$E = \frac{\sqrt{60P_\Sigma}}{x} \sin(\omega t - kx + \varphi_0). \quad (3)$$

В дальнейшем там, где при анализе зависимость амплитуды от расстояния и значение начальной фазы не играют особой роли, чтобы не загромождать формулы, они будут опускаться, и вместо формулы (3) будем писать:

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx) = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x\right). \quad (4)$$

Если волна распространяется в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ε , то электрический вектор записывается в виде:

$$E = E_0 \sin(\omega t - k\sqrt{\varepsilon}x) = E_0 \sin(\omega t - k\sqrt{\varepsilon}x) = E_0 \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c/\sqrt{\varepsilon}} x\right), \quad (5)$$

т.е. диэлектрик оказывает влияние на фазу волны и, следовательно, на фазовую скорость, которая уменьшается в $\sqrt{\varepsilon}$ раз. Величина $\sqrt{\varepsilon} = n$ носит название коэффициента преломления среды.

Здесь вполне уместен вопрос: «А зависит ли диэлектрическая проницаемость ε от частоты ω ?». Ответ на этот вопрос утвердительный. Существуют специальные справочные таблицы, отражающие эту зависимость для различных сред. Ниже будут приведены некоторые данные по этому вопросу.

Приведенные соотношения относились к ситуации, когда второй параметр среды – ее проводимость σ была равна нулю, т.е. $\sigma = 0$.

Если учесть потери энергии при РРВ, то формула требует модификации, что с успехом выполняет множитель ослабления – $V(\omega, R, \delta, \varepsilon, \mu)$, приводящий к соотношению $E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{\Sigma} D}}{R} \cdot V(\omega, R, \delta, \varepsilon, \mu)$

Большинство реальных задач по распространению радиоволн сводятся к определению множителя ослабления, который, в первую очередь, зависит от частоты и от расстояния

1.2. Среда с потерями

Ситуация резко меняется для случая конечной проводимости σ , что вызывается наличием токов проводимости и, как следствие, возникновением омических, т.е. тепловых потерь.

Вместо зависимости (2) теперь будем иметь:

$$E = E_0 \cdot e^{-\alpha kx} \cos(\omega t - \beta kx) = E_0 \cdot 10^{-0,434 \alpha kx} \cos(\omega t - \beta kx), \quad (6)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{(60 \lambda \sigma)^2 + \varepsilon^2} - \varepsilon \right)}, \quad (7)$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{(60 \lambda \sigma)^2 + \varepsilon^2} + \varepsilon \right)}. \quad (8)$$

Принципиальное отличие формулы (6) от формулы (5) состоит, прежде всего, в зависимости амплитуды волны от расстояния, носящей убывающий характер по экспоненциальному (показательному) закону.

Второе отличие состоит в том, что оба определяющие параметра α и β принципиально зависят от длины волны (частоты).

В дальнейшем для удобства условно α будем называть коэффициентом затухания, а параметр β - фазовым коэффициентом.

Как уже говорилось выше, распространения радиоволн существенным образом зависит от электрофизических характеристик среды распространения, а поэтому ниже рассматриваются особенности характеристик почвы и атмосферы.

Рассмотрим характер изменения амплитуды и фазы

По мере удаления от источника излучения амплитуда радиоволны волны уменьшается, во-первых, как $1/R$, что является следствием переноса энергии в пространстве, а, во вторых, по экспоненциальному закону, что является следствием поглощения энергии молекулами среды распространения.

Как видно из приведенных соотношений, эти потери в одной и той же среде существенно зависят от длины волны - λ (частоты - ω) распространяющейся радиоволны. На низких частотах, когда длина волны λ достаточна велика, имеем $60\lambda\sigma \gg \varepsilon$, а поэтому среда по своим свойствам ведет себя как проводник. Именно поэтому на длинных и сверхдлинных радиоволнах земная поверхность ведет себя как идеальный проводник.

Напротив, если $60\lambda\sigma \ll \varepsilon$, то среда ведет себя как диэлектрик.

Таким образом, одна и та же среда в зависимости от длины волны (частоты) радиоволны ведет себя как вещество, близкое к проводнику на низких частотах (длинных волнах), или как вещество, по своим свойствам близкое к диэлектрику на высоких частотах.

Выпишем основные соотношения для слабо и сильно проводящих сред.

1. Хорошо проводящая среда.

В этом случае $60\lambda\sigma \gg \varepsilon$, тогда α и β оказываются примерно одинаковыми: $\alpha \approx \beta \approx 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}$.

Фазовая скорость волны будет равна: $V_\phi \approx \frac{c}{\sqrt{30\lambda\sigma}}$, а длина волны в среде: $\lambda_{cp} = \frac{V_\phi}{f} \cong \sqrt{\frac{\lambda_0}{30\sigma}}$, здесь c - скорость света.

2. Плохо поводящая среда.

В этом случае $60\lambda\sigma \ll \varepsilon$, тогда $\alpha \approx \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\varepsilon}}$, а $\beta = k\sqrt{\varepsilon}$.

Фазовая скорость волны: $V_\phi \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$, а длина волны в среде: $\lambda_{cp} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}}$, здесь c - скорость света.

В проводящей среде фазовая скорость зависит от частоты, это явление в физике называется дисперсией. Когда в такой среде распространяется импульс с широким спектром, то различные частотные составляющие этого импульса будут распространяться с разными фазовыми скоростями, что неизбежно приводит к искажению сигнала. Высокочастотные и низкочастотные составляющие могут иметь заметную разницу в скоростях.

Скорость высокочастотной составляющей влияет на выход по фронту импульса, а низкочастотная составляющая на форму огибающей, т.е. на плоскую часть импульса.

Сформулированные выше заключения опирались на узловую гипотезу, что как диэлектрическая проницаемость среды ϵ_0 , так и ее проводимость σ зависят от частоты только через λ , т.е. $\epsilon(\lambda)=\epsilon_0=\text{const}$ и $\sigma(\lambda)=60\lambda\sigma_0$. Иными словами, считалось, что сами ϵ_0 и σ_0 от частоты не зависят.

Однако, в реальных средах это далеко не так. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости воды

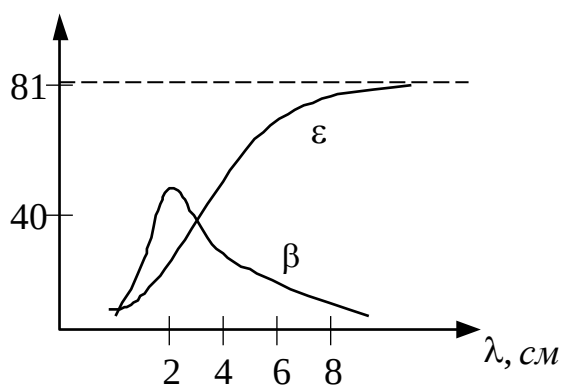


Рис.2. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и фазового коэффициента β для воды.

Если на низких частотах диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon=81$, то с ростом частоты ее значение существенно уменьшается и в диапазоне волн $\lambda \sim 2$ см имеет место трехкратное падение ее значения до величины $\epsilon \approx 27 \sim 30$.

Дальность прямой видимости.

Сферичность Земли с необходимостью требует введения понятия – расстояния прямой видимости - $R_{ПВ}$, т.е., образно говоря, «расстояния до горизонта», которое играет заметную роль при оценке дальности действия радиопередающих устройств и дальности обнаружения наблюдаемых целей. Понятие такого расстояния органически связано с различными задачами, возникающими при анализе процессов, связанных с распространением радиоволн различных диапазонов.

Пусть источник радиоизлучения находится в точке A , расположенной на высоте h_1 над поверхностью Земли, а прием радиоволны осуществляется в точке B , находящейся на высоте h_2 . Требуется найти расстояние $R_{ПВ}$, на котором из точки A будет видна точка B (рис. 3).

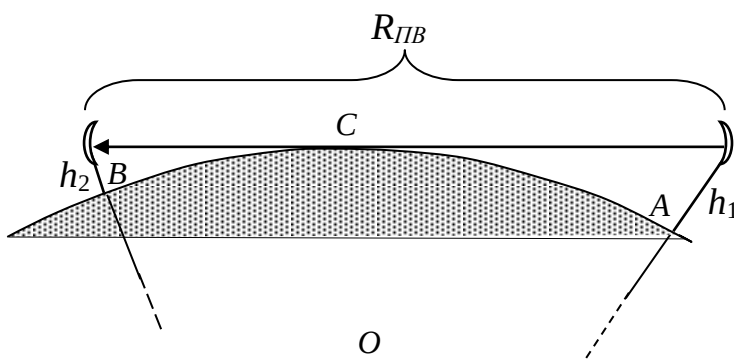


Рис. 3. К определению расстояния прямой видимости

Из треугольника OCA вытекает, что $AC = \sqrt{AO^2 - OC^2} = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2}$,

аналогично $BC = \sqrt{(R + h_2)^2 - R^2}$, где $R=6400$ км - радиус Земли

Искомое расстояние прямой видимости, очевидно, будет равно $R_{ПВ}=AC+BC$.

Проведя элементарные преобразования с учетом, что $h_1 \ll R$, получим

$$AC = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2} = R \sqrt{2 \frac{h_1}{R} \left(1 + \frac{h_1}{2R}\right)} \approx \sqrt{2h_1 R} \quad \text{и} \quad \text{соответственно}$$

$$BC \approx \sqrt{2h_2 R}, \text{ т.е. искомое } R_{ПВ} = \sqrt{2R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

Если h_1 и h_2 выражать в метрах, то для $R_{ПВ}$, выраженной в км, получим расчетную формулу $R_{ПВ} = 3,57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$. Если учесть тропосферную рефракцию, то искомое расстояние можно рассчитывать следующим образом $R_{ПВ} = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$. Поскольку коэффициент преломления атмосферы с высотой убывает, то дальность прямой видимости будет возрастать примерно на 15%.

2. Области распространения радиоволн

С точки зрения распространения радиоволн (РРВ) пространство, окружающее Землю, можно разделить на три зоны атмосфера – ионосфера – открытый космос (рис. 4), при этом, в свою очередь, атмосфера подразделяется на тропосферу (до высот 12-13 км) и стратосферу (до высот 15-60 км).



Рис.4. Схема строения атмосферы

2.1. Почва

Несмотря на все разнообразие почв в рамках электромагнитных процессов, как об этом уже говорилось выше, каждая из них характеризуется двумя числами диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ .

В Таблице 2.1 приведены значения ε и σ для некоторых типов почв как среды распространения радиоволн

Таблица 2.1

**Диэлектрические проницаемости и
удельные проводимости некоторых природных сред**

Типы почв	ε - проницаемость	σ [См/м] - проводимость
морская вода	80	4
пресная вода	80	10^{-4}
влажная почва	10	10^{-2}
умеренно влажная почва	4÷6	10^{-3}
сухая почва	3÷4	10^{-4}

В Таблице 2.2 представлены удельные проводимости σ в См/м некоторых веществ при температуре $+20^\circ\text{C}$ в электростатичном поле (нулевая частота)

Таблица 2.2.

Удельные проводимости некоторых природных сред

Среда	σ [См/м]	Среда	σ [См/м]	Среда	σ [См/м]
вода дистил.	10^{-4}	земля влаж.	10^{-2}	стекло кварц.	10^{-16}
вода морская	4	мрамор	10^{-8}	фарфор	10^{-14}
графит	125 000	стекло	10^{-11}	янтарь	10^{-18}

2.2. Тропосфера

Отличительная черта тропосферы постоянство газового состава. Что касается ее диэлектрической проницаемости ε_T , то ее значение в сильной степени зависит от трех физических характеристик: давления - p , температуры - T и влажности e , которые напрямую зависят от высоты над поверхностью земли $-h$, т.е. $\varepsilon_T = \varepsilon_T(p, T, e; h)$.

В идеальной модели тропосферы принято считать линейное уменьшение температуры с высотой.

Общий эффект влияния названных выше физических характеристик тропосферы состоит в том, что значение ε_T с высотой имеет общую тенденцию к уменьшению (что не исключает его локальные флуктуации) своего значения вплоть до величины, равной $\varepsilon_T=1$, что и определяет верхнюю границу тропосферы.

Даже в приповерхностных слоях тропосферы значение ε мало отличается от 1, а поэтому вместо ε часто используют понятие коэффициента преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$ и индекса преломления $N = (n-1) \cdot 10^6$.

На поверхности земли $N_T \approx 328$, его значение с высотой убывает до нулевой величины на верхней границе тропосферы. Следует подчеркнуть, что на эту зависимость накладываются также хаотические изменения, вызванные локальными турбулентными движениями воздуха.

При расчетах, чаще всего, используют не диэлектрическую проницаемость среды ε , а коэффициент преломления этой среды $n = \sqrt{\varepsilon}$, а также, поскольку отличие диэлектрической проницаемости воздуха от проницаемости свободного пространства крайне мало, так называемый, индекс преломления: $N_{np} = (n-1) \cdot 10^6$,

В рамках существующих электрофизических моделей тропосферы используется линейная аппроксимация уменьшения индекса преломления с высотой, в соответствии с которой на высоте 7,5-8 км он должен обратиться в нуль, что однако не находит экспериментального подтверждения. Реально эта зависимость отличается от линейной. Кроме того, в связи вихревым характером движения воздуха на искомую функцию накладываются флуктуации,.

На рис. 5 показана зависимость индекса преломления от высоты. Одна кривая дает представление о том, как реально происходит изменение индекса, другая - представляет собой статистически усредненную зависимость. Прямая

линия отражает закономерность уменьшения индекса преломления в общепринятой модели.

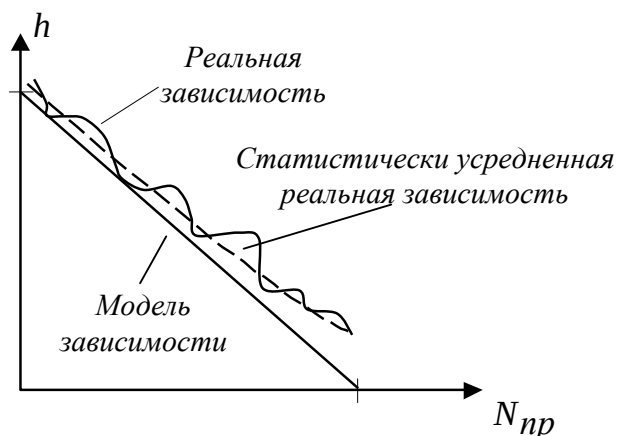


Рис. 5 Зависимость индекса преломления от высоты

2.2. Стратосфера

Область высот, которую занимает стратосфера, находится в пределах от 15 до 60 км.

Внутри тропосферы температура воздуха с высотой убывает практически линейно, однако затем уже в зоне стратосферы она начинает возрастать и на высоте 20-25 км имеет место локальный максимум температуры, вызванный образованием озона. В дальнейшем после небольшого падения температура начинает расти (рис. 6).

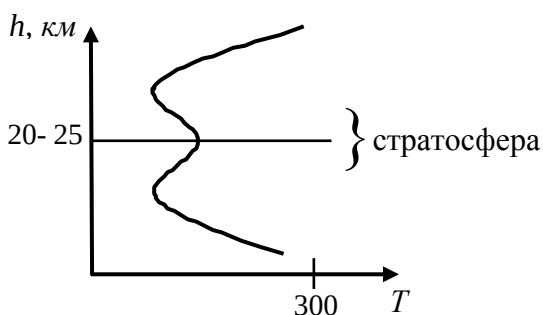


Рис.6. Изменение температуры в стратосфере.

2.3. Ионосфера.

Ионосфера располагается достаточно далеко от Земли, а влияние Солнца проявляется существенно больше, чем в нижних слоях атмосферы, что создает благоприятные условия для ионизации среды, т.е. условия для отрыва электронов от атомов, вследствие чего молекулы распадаются на ионы и в электроны. В итоге, что крайне принципиально для распространения радиоволн, непроводящая среда, каковой является воздух, из-за появления в нем свободных электронов и ионов начинает становиться проводящей!

Однако наряду с ионизацией происходит обратный процесс – рекомбинация, т.е. формирование из свободных ионов и электронов нейтральных молекул газа.

Такая среда характеризуется двумя параметрами: числом электронов в единице объема (степень ионизации) - N_e и числом соударений в единицу времени - ν . Их численное значение напрямую зависит от высоты (рис. 4)

Эти процессы действуют «навстречу друг другу». С одной стороны, концентрация частиц уменьшается, с другой стороны - действие солнечного излучения становится все сильнее, а поэтому на некоторой высоте должен наблюдаться максимум. Такая зависимость электронной концентрации от высоты, носит название *простого слоя* (рис. 7).

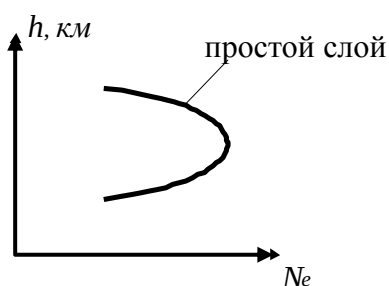


Рис.7. Зависимость электронной концентрации от высоты.

Очевидно, что на характер этой зависимости должно влиять время суток. Ночью ионизация будет существенно слабее, чем в дневное время. Кроме того, на картину накладывается закон изменения температуры с высотой. Поэтому ионосфера представляет собой слоистую структуру.

В дневное время в ионосфере четко выделяются три слоя:

- слой D (высота 70 км, концентрация электронов несколько сотен),
- слой E (высота 100÷120 км, концентрация электронов - $10^3 \div 10^4$),
- слой F (высота 300÷400 км, концентрация электронов - $10^5 \div 10^6$). В

дневное время суток этот слой расщепляется на два подслоя F_1 и F_2 .

В ночное время суток действие ионизирующих факторов ослабевает. Электронная концентрация уменьшается до такой степени, что слой D исчезает вообще, а остальные слои опускаются ниже, ближе к Земле.

Сказанное иллюстрируется рис. 8.

Узловым вопросом, определяющим взаимодействие радиоволн с ионосферой, является влияние частоты радиоволны на диэлектрическую проницаемость и проводимости ионосферы.

Эта задача поддается непосредственному аналитическому решению, устанавливающему прямую связь основных электрических характеристик ионосферы - диэлектрической проницаемости ϵ , проводимости σ , коэффициента затухания α и фазовой скорости V_ϕ с физическими характеристиками ионосферы – числом электронов в единице объема (степенью ионизации) - N_e и числом соударений в единицу времени - ν . В этих соотношениях в качестве равноправного «партнера» фигурирует также частота радиоволны, свидетельствующая о жесткой зависимости параметров ионосферы от частоты.

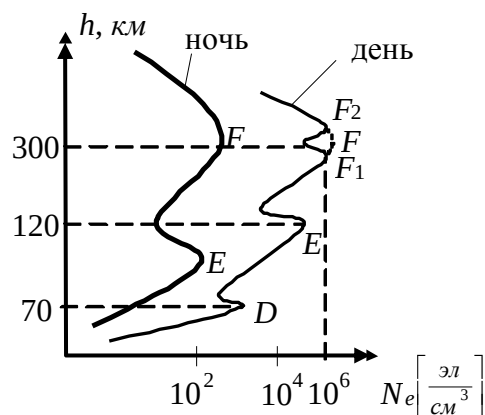


Рис. 8. Изменения электронной концентрации с высотой.

Формулы, о которых говорится выше, приведены на рис.9, где также дано их графическое представление.

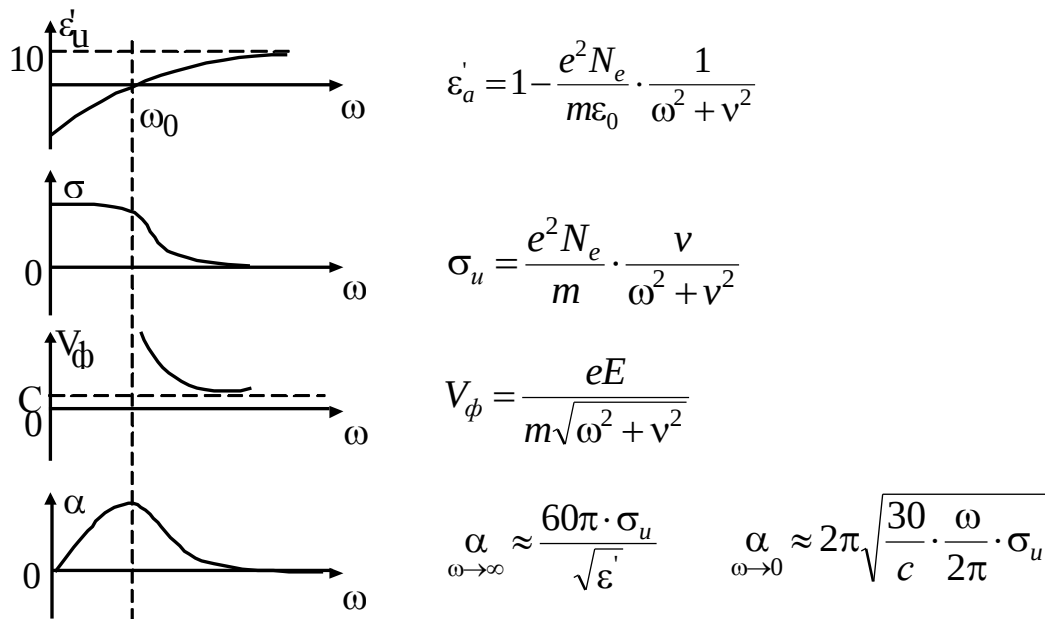


Рис. 9. Зависимость электрофизических характеристик ионосферы от частоты

Здесь, в первую очередь, следует обратить внимание, что при постоянных (!) физических характеристиках ионосферы ее диэлектрическая проницаемость ε и проводимость σ существенно зависят от частоты. Это приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость ε может обратиться в нуль и даже стать отрицательной. Именно это свойство ионосферы принципиально отличает ее от других природных сред.

Приведенные рисунки и аналитические зависимости иллюстрируют сказанное. На низких частотах, когда ω стремится к нулю ε становится отрицательным, и, напротив, с ростом частоты ε стремится к единице (к диэлектрической проницаемости свободного пространства). Таким образом, на высоких частотах ионосфера представляет собой среду близкую к вакууму. При переходе от малых к большим частотам кривая диэлектрической проницаемости пересекает ось абсцисс на некоторой частоте f_0 , носящей

название плазменной частоты. Чтобы ее найти, надо приравнять к единице второе слагаемое, в результате чего получим $f_0[KГц] \approx 9 \cdot \sqrt{Ne} \left[\frac{\text{эл}}{\text{см}^3} \right]$.

На низких частотах проводимость ионосферы σ обратно пропорциональна частоте, а на высоких частотах ее значение стремится к нулю. Таким образом, ионосфера на высоких частотах не замечает наличия свободных электронов.

Фазовая скорость определяется соотношением $V_\phi = \frac{c}{\epsilon_a}$. На частотах меньше, чем ω_0 , диэлектрическая проницаемость отрицательна, т.е. фазовая скорость на низких частотах равна 0. На высоких частотах, V_ϕ стремится к скорости света.

На низких частотах, проводимость σ ионосферы довольно большая, следовательно, ионосфера ведет себя как хорошо проводящая среда. В этом случае коэффициент затухания на низких частотах будет

$$\alpha_{\omega \rightarrow 0} \approx 2\pi \sqrt{\frac{30\sigma_u}{\lambda}} = 2\pi \sqrt{\frac{30}{C} \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \sigma_u} \sim \sqrt{\omega}; \text{ а на высоких } \alpha_{\omega \rightarrow \infty} \approx \frac{60\pi \cdot \sigma_u}{\sqrt{\epsilon'}} \sim \frac{1}{\omega^2}.$$

Максимум поглощения будет в окрестности плазменной частоты. На высоких частотах поглощение минимально.

Таким образом, на низких частотах ионосфера ведет себя как проводящая среда, а на очень высоких частотах - как диэлектрик с параметрами, близкими к характеристикам свободного пространства.

3. Особенности распространения радиоволн в тропосфере

Для простоты будем считать Землю плоской. Как уже говорилось, с ростом высоты диэлектрическая проницаемость тропосферы убывает. Разобьем тропосферу на бесконечно тонкие слои. Пусть на границу раздела падает под некоторым углом электромагнитная волна, которая, распространяясь в такой среде, непрерывно переходит из среды более плотной (в оптическом смысле) в среду менее плотную. После прохождения границы

раздела траектория волны меняется, происходит ее наклон в сторону границы разрыва. Такой процесс продолжается до тех пор, пока траектория волны станет параллельна поверхности Земли. В дальнейшем волна будет переходить из менее плотной в более плотную среду и, в конечном счете, волна выйдет из тропосферы под тем же углом, под которым вошла в нее. Это явление носит название рефракции в тропосфере (рис. 10).

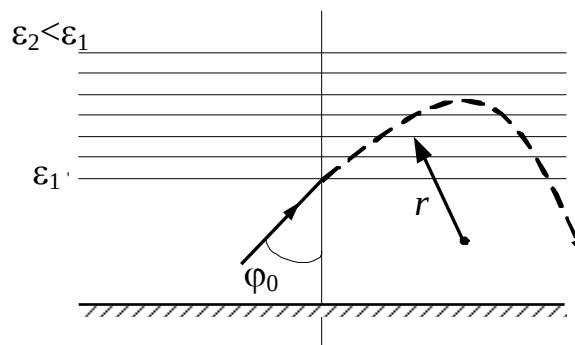


Рис. 10. Траектория движения волны в тропосфере.

Таким образом, прямолинейное распространение, которое имеет место в однородной среде, превращается в криволинейное распространение.

Особенность тропосферы состоит в том, что она насыщена различными гидрометеорами, включающими в себя водяной пар, капли дождя, снег, град. Электромагнитная волна, проходя такую среду, индуцирует в гидрометеорах токи. Следствием этого являются два момента. Во-первых, часть энергии электромагнитной волны тратится на омические (тепловые) потери, а во-вторых, эти токи становятся источниками самостоятельного электромагнитного излучения.

Влияние этих факторов в очень сильной степени зависят от частоты электромагнитной волны, проходящей через такую среду.

На рис. 11, показана зависимость коэффициента затухания атмосферы α , определенного формулой (6), от длины волны.

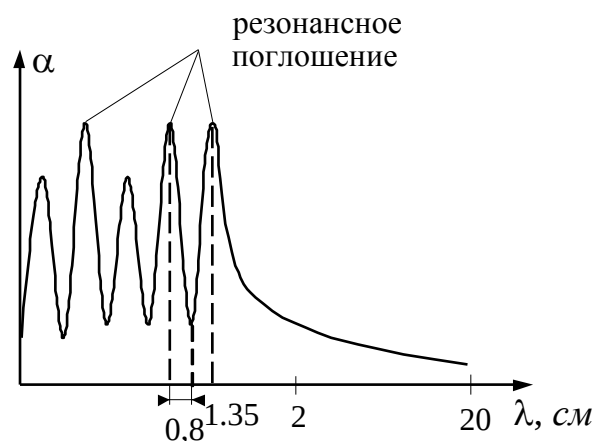


Рис. 11. Зависимость коэффициента затухания атмосферы α от длины волны λ

Практика показывает, что на волны, длина которых больше, чем 20-30 см т.е., ($\lambda > 20-30$ см), тропосфера с точки зрения затухания радиоволн никак себя не проявляет, т.е. можно считать, что поглощение в тропосфере отсутствует.

Поглощение начинает проявлять себя на волнах, длина которых меньше 20 см.

Каждая капля, как только в ней появляется ток, становится вторичным источником излучения. Таким образом, в точку приема приходит волна, образованная интерференцией очень большого числа полей от отдельных капель. В диапазоне длин волн от 2 до 20 см, поглощение с увеличением частоты (с уменьшением длины волны) будет расти. Поглощение может быть столь большим (во время тумана), что радиолокационные станции теряют возможность работать, т.е. дальность их действия ухудшается настолько, что цели, которые обычно видны, перестают быть видимыми. Поглощение увеличивается в тысячу и более раз.

На длинах волн, короче полутора сантиметра, наблюдается *резонансное поглощение*, вызванное тем, что длины волн могут совпадать с частотами перехода электронов в молекулах газов содержащихся в воздухе, на другие энергетические уровни. Например, на длине волны 1,35 см имеет место повышенное поглощение в водяном паре, что свидетельствует о том, что в водяном паре (H_2O) атомы кислорода или водорода, возбуждаясь проходящей

электромагнитной волной, приобретают энергию, дающую возможность осуществить переход на новые энергетические уровни.

Как видно из рис. 9, на радиоволнах с длиной свыше 20 см поглощения нет. При уменьшении длины волны в гидрометеорах индуцируются токи проводимости, что влечет за собой рост потерь энергии радиоволны, достигающий максимума при длине волны в 1,5 см, что вызвано резонансными явлениями (резонансный пик) в молекулах паров воды, но поскольку в атмосфере присутствуют молекулы разных газов (углекислый газ, кислород, азот), то таких длин волн, где наблюдаются резонансные пики, достаточно много. На длинах волн, лежащих между этими резонансными пиками, потери энергии минимальны. Такие зоны носят название «окон прозрачности». Наиболее широко используемые окна прозрачности в миллиметровом диапазоне соответствует длинам волн в 3 и 8 мм.

4. Особенности распространение радиоволн в ионосфере

Возьмем некоторый слой ионизированного газа (рис. 12), понятие которого было введено в п. 2.3, и разделим его на множество слоев. Будем считать, что мы находимся в нижней части слоя, с высотой электронная концентрация возрастает, а поэтому диэлектрическая проницаемость будет убывать. Следовательно, при падении электромагнитной волны на нижнюю поверхность такой среды с переходом в каждый следующий тонкий слой волна будет отклоняться от нормали к поверхности слоя, т.к. будет осуществляться переход из оптической более плотной в менее плотную среду.

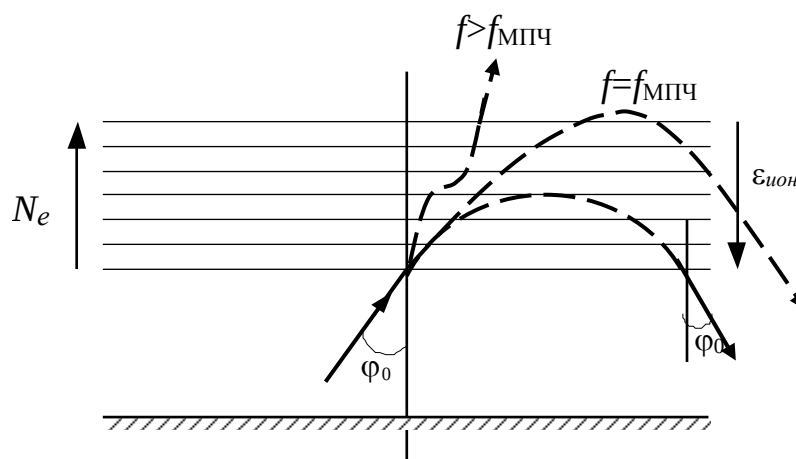


Рис.12. Слой E разделенный на множество слоев.

Если волна падает на слой под углом φ_0 , то в следующих слоях она будет отклоняться вправо до тех пор, пока не пойдет параллельно границе слоя. Затем она волна начнет загибаться вниз и, в конце концов, выйдет из слоя под тем же углом φ_0 . Здесь имеет место полная аналогия с явлением рефракции в тропосфере. С другой стороны, налицо принципиальное различие в процессе распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере. Это различие проистекает из того факта, что электрические характеристики ионосферы зависят, а точнее определяются, частотой радиоволны. В тропосфере такой связи нет.

С изменением частоты картина, подобная тропосферной рефракции, будет меняться.

При увеличении частоты ионосфера по своим электрическим характеристикам приближается к свободному пространству, а явление преломления (рефракция), будет сказываться все меньше и меньше и на высоких частотах углы отклонения от нормали будут становиться меньше, чем на низких частотах, а, следовательно, волна пойдет выше. При дальнейшем увеличении частоты диэлектрическая проницаемость ионосферы все ближе будет приближаться к значению, равному 1, и, следовательно, преломления практически не будет. Волна будет распространяться прямолинейно.

Ясно, что при любом угле падения $\varphi_0 = const$, всегда найдется некоторая частота, на которой отражение не будет. Такая частота называется *максимально применимой частотой* ($f_{МПЧ}$).

Рассмотрим другую ситуацию. Зафиксируем некоторую частоту f и будем изменять угол падения. Чем выше рабочая частота, тем при постоянном угле падения все выше нужно подняться, чтобы найти тот слой, от которого будет происходить отражение и наоборот. При фиксированном угле падения и изменении частоты, найдется такая частота, выше которой волна будет уходить за пределы ионосферы.

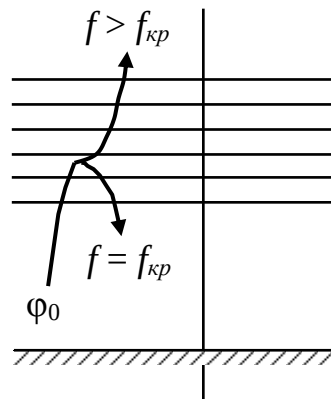


Рис.13. Изменение частоты при фиксированном угле падения.

Если $\varphi_0 = 0$, то соответствующая волне частота, которая еще отражается от ионосферы, называется *критической частотой*. Ее значение определяется формулой $f_{кр} \cong \sqrt{80.8 \cdot N_e}$. При частоте выше критической условие отражения не выполняется, и волна проходит ионосферу насквозь. На частотах ниже критической отражение будет происходить на меньших высотах (рис. 13).

Значение критической частоты для разных слоев ионосферы приведены в Таблице.

Таблица 4.1

Слой	N_e	$f_{кр}, KГц$	$f_{кр}, с учетом сферичности$
D	10^2	90	270 KГц
E	10^4	900	3 MГц
F	$0,5 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$	20 MГц

Из Таблицы 4.1 видно, что при работе на частотах меньше 270 КГц, волна выше слоя D пройти не сможет, она будет отражаться от слоя D . При увеличении частоты, электронной концентрации для отражения потребуется больше, и в качестве отражающего слоя будет выступать слой E . Если частоту сделать выше 3 МГц, то отражения будет происходить уже от слоя F .

5. Область пространства, существенная при распространении радиоволн

Энергия, излучаемая, точечным источником радиоволн, равномерно по всем направлениям распределяется в пространстве. Для оптического диапазона волн вполне приемлемой является лучевая трактовка переноса энергии из точки O в точку B , при которой луч считается чрезвычайно тонким.

Рассмотрим что изменится, если от оптики перейти радиодиапазонам.

Пусть в точке A находится источник излучения радиоволн длиной λ , прием которых осуществляется на расстоянии R в точке B . Проведем плоскость MN , перпендикулярную прямой OB (рис. 15).

В соответствии с принципом Гюйгенса – Френеля каждую точку этой плоскости можно считать точечным источником излучения. Наблюдатель, находящийся в точке B , принципиально не может дать ответ на вопрос, что является источником излучения: излучатель, расположенный в точке B , излучающий волну частотой ω с амплитудой A_0 и какой-то начальной фазой φ_0 , т.е. $S(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$, или набор точечных излучателей Q , расположенных на плоскости MN , амплитуда которых равна $A_0/|OQ|$, а фаза отличается от исходной на $2\pi \cdot |OQ|/\lambda$, т.е.

$$S_Q(t) = \frac{A_0}{|OQ|} \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} |OQ|\right) = S_Q(t) = \frac{A_0}{|OQ|} \sin(\omega t + \varphi_0 - k|OQ|).$$

В формуле введено стандартное обозначение для , так называемого, волнового числа $k = 2\pi/\lambda$

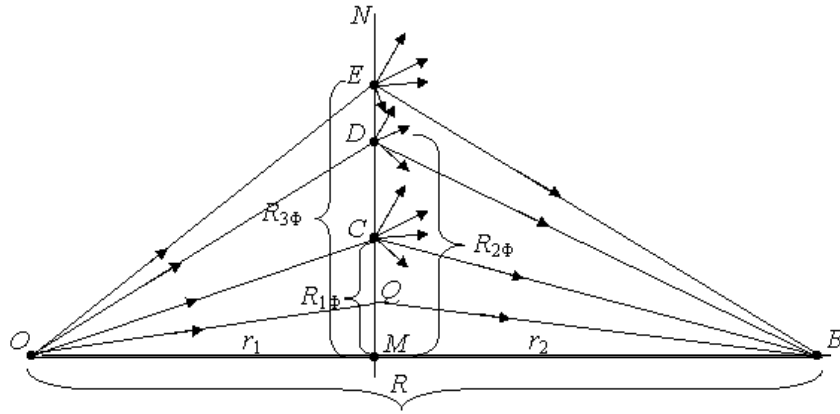


Рис. 15. К формированию области, существенной при распространении радиоволн

Таким образом, поле в точке B будет представлять собой алгебраическую сумму полей, создаваемых всеми точками Q , находящимися на плоскости MN , каждое из которых будет описываться выражением

$$S_{OQB}(t) = \frac{A_0}{|OQ| \cdot |QB|} \sin(\omega t + \varphi_0 - k(|OQ| + |QB|)). \quad \text{В соответствии с}$$

сформулированным выше принципом Гюйгенса сумма всех $S_{OQB}(t)$ при условии, что точки Q занимают всю прямую от $-\infty$ до $+\infty$, очевидно будет равна

$$S_B(t) = \frac{A_0}{R} \sin(\omega t + \varphi_0 - kR).$$

Рассмотрим, как формируется амплитуда суммарного сигнала в точке B . Прежде всего, обратим внимание на то, что в силу того в реальных условиях расстояние между токами O и B существенно превышает зону, где происходит

изменение положения точки Q , амплитуду $S_0 = \frac{A_0}{|OQ| \cdot |QB|}$ можно считать

практически неизменной.

Формирование поля в точке B начнем со сложения полей, порождаемых в точках M и Q :

$$\begin{aligned} S_{\text{сум}}(t) &= S_0 [\sin(\omega t + \varphi_0 - k(|OM| + |MB|)) + \sin(\omega t + \varphi_0 - k(|OQ| + |QB|))] = \\ &= S_0 \left[\sin(\omega t + \varphi_0 - kR) + \sin\left(\omega t + \varphi_0 - k\left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2}\right)\right) \right] = \end{aligned}$$

$$= 2S_0 \left[\cos \left[\frac{k}{2} \left(R - \left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \right) \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \sin \left\{ \omega t + \varphi_0 - \frac{k}{2} \left(R + \left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \right) \right) \right\} \right]$$

Как видно из полученного соотношения амплитуда этого суммарного колебания определяется знакопеременным выражением:

$$= 2S_0 \cos \left[\frac{k}{2} \left(R - \left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \right) \right) \right].$$

Если это выражение больше 0, то его вклад в общую сумму приводит к росту суммарной амплитуды, в противном случае итоговая сумма будет уменьшаться. Граница такого перехода, очевидно, будет определяться равенством: $\cos \left[\frac{k}{2} \left(R - \left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \right) \right) \right] = 0$,

$$\text{т.е. } R - \left(\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} + \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \right) = \frac{\lambda}{2}.$$

Преобразуем полученные соотношения с учетом того, что $y_Q \ll r_1$ и r_2 :

$$\sqrt{r_1^2 + y_Q^2} = r_1 \sqrt{1 + \frac{y_Q^2}{r_1^2}} \approx r_1 \left(1 + \frac{y_Q^2}{2r_1^2} \right), \quad \text{аналогично} \quad \sqrt{r_2^2 + y_Q^2} \approx r_2 \left(1 + \frac{y_Q^2}{2r_2^2} \right).$$

Учитывая, что $R = r_1 + r_2$, окончательно получим $y_C = \sqrt{\frac{r_1 r_2 \lambda}{R}} = R_{\Phi 1}$. Эта величина носит название радиуса первой зоны Френеля.

Источники, находящиеся выше точки C , уменьшают (!) амплитуду суммарного сигнала в точке B , такой эффект продолжается до тех пор пока разность фаз не достигнет величины π , после чего суммарная амплитуда вновь начинает увеличиваться. Такие границы носят названия границ зоны Френеля.

Радиус n -ой зоны Френеля будут равны $R_{\Phi n} = \sqrt{\frac{r_1 r_2}{R}} n \lambda$.

Чтобы получить пространственную картину, надо совершить оборот рисунка вокруг линии OB .

В этом случае можно говорить о центральной зоне радиусом первой зоны Френеля, ей можно приписать знак «+» в создания поля, соседняя область создает знак «-», следующая область создает знак «+» и т.д. Другими словами, если откладывать номера зон, то центральная область будет создавать поле примерно в два раза больше, нежели реальное значение поле, которое можно подсчитать в точке B точными способами.

Чем больше номер зон Френеля, тем меньше разница между соседними радиусами, тем меньше вносят они вклад в суммарное поле. Практически решающий вклад в суммарное поле в точке B вносят источники, находящиеся в пределах первых 2-3 зон Френеля. Иными словами, почти вся энергия от источника в точке O передается в точку B переносится внутри пространственной фигуры, напоминающий собой некий эллипсоид вращения. Максимальный размер эта фигура достигает на середине участка OB , т.е., когда $r_1 = r_2 = R/2$, ее высота в этом случае будет равняться $R_{\phi \max} = \frac{1}{2} \sqrt{(2-3)\lambda R}$.

Рассмотренный «эллипсоид» представляет собой область, существенную при распространении радиоволн. Если она свободна от посторонних объектов, то можно говорить о распространении волн в свободном пространстве. Если в пределах этой зоны оказываются сторонние объекты (горы, возвышенности, строения и т.п.), то ситуация может коренным образом измениться.

Сечение эллипсоидов вертикальной плоскостью показано на рис. 16

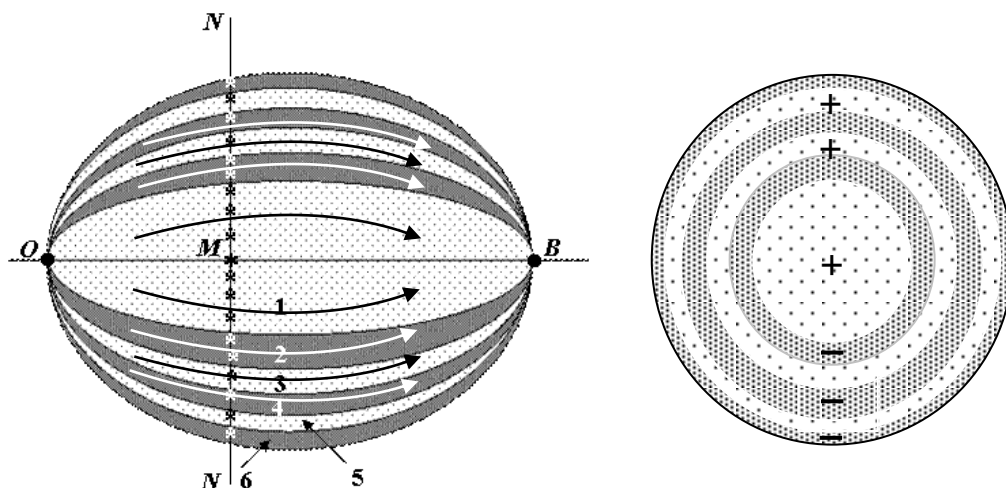


Рис. 16. Иллюстрация зон Френеля

Вертикальные размеры каждого из эллипсов – это радиусы последовательно 1, 2, 3, 4, 5 и 6 зон Френеля

Светлые эллипсоиды (1, 3 и 5) – это те области пространства, поток электромагнитной энергии через которые увеличивает интенсивность электромагнитного поля в точке приема B , а темные эллипсоиды (2, 4 и 6), напротив, ее уменьшают. Звездочки на линии NMN – иллюстрируют «вторичные» излучатели.

6. Классификация радиоволн

На распространение радиоволн самое существенное влияние оказывают электрофизические параметры Земли, ионосферы, тропосферы, рельеф местности и пр. Одновременный учет всех этих факторов представляет собой весьма сложную задачу, однако в зависимости от диапазона частот роль каждого из них меняется. Поэтому при изучении вопросов, связанных с распространением радиоволн в конкретном диапазоне, целесообразно построить такую модель, которая, с одной стороны, будет отражать все наиболее существенные для данного диапазона волн свойства Земли и ее атмосферы, а с другой – была бы проста для исследования

Радиоволны могут достигать точки приема за счет земной (поверхностной) волны, либо за счет пространственной, под которой понимают волны, отраженные или рассеянные в ионосфере (ионосферные волны), а также рассеянные на неоднородностях тропосферы.

Существуют несколько относительно различных систем классификации электромагнитных волн в зависимости от частоты (длины волны).

В Таблице 6.1. приведена наиболее распространенная классификация радиоволн, а в Таблице 6.2. – другая широко распространенная классификация радиоволн. В этой же Таблице приведены основные области деятельности человека, где используются волны той или иной частоты

Таблица 6.1

Классификация радиоволн по длине волны

Диапазон	Наименование	Длина волны	Частота
СДВ	Сверхдлинные волны	110-10 км	3 – 30 кГц
ДВ	Длинные волны	10 км – 1 км	30 – 300 кГц
СВ	Средние волны	1000 – 100 м	300 кГц – 3 МГц
КВ	Короткие волны	100 – 10 м	3 – 30 МГц
М	Метровые волны	10 – 1 м	30 – 300 МГц
ДЦМ	Дециметровые волны	1 м – 10 см	300 МГц – 3 ГГц
СМ	Сантиметровые волны	10 – 1 см	3 – 30 ГГц
ММ	Миллиметровые волны	1 см – 1 мм	30 – 300 ГГц
ДММ	Декаметровые волны	1 мм – 0,1 мм	300 ГГц 3 ТГц

Таблица 6.2.

Классификация радиоволн по длине волны и частоте

Обознач. МСЭ	Длина волн	Название волн	Диапазон частот	Название частот	Применение
ELF	100 - 10 Мм	Декамега-метровые	3-30 Гц	Крайне низкие (КНЧ)	Связь с подводными лодками геофизические исследования
SLF	10 - 1 Мм	Мега-метровые	30-300 Гц	Сверхнизкие (СНЧ)	Связь с подводными лодками геофизические исследования
ULF	1000- 100 км	Гектокило-метровые	300-3000 Гц	Инфранизкие (ИНЧ)	Связь с подводными лодками
VLF	100 - 10 км	Мириа-метровые	3-30 кГц	Очень низкие (ОНЧ)	Связь с подводными лодками
LF	10 - 1 км	Кило-метровые	30-300 кГц	Низкие (НЧ)	Радиовещание, радиосвязь
MF	1000 - 100 м	Гекто-метровые	300-3000 кГц	Средние (СЧ)	Радиовещание, радиосвязь
HF	100 - 10 м	Дека-метровые	3-30 МГц	Высокие (ВЧ)	Радиовещание, радиосвязь, рации
VHF	10 - 1 м	Метровые волны	30-300 МГц	Очень высокие (ОВЧ)	Телевидение, радиовещание, радиосвязь, рации
UHF	1000 - 100 мм	Деци-метровые	300-3000 МГц	Ультравысокие (УВЧ)	Телевидение, радиосвязь, Мобильные телефоны, рации, микроволновые печи, спутниковая навигация.
SHF	100 - 10 мм	Сантиметровые	3-30 ГГц	Сверхвысокие (СВЧ)	Радиолокация, интернет, спутниковое телевидение, радиосвязь, Беспроводные компьютерные сети.

EHF	10 - 1 мм	Милли- метровые	30-300 ГГц	Крайне высокие (КВЧ)	Радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь, метеорологические радиолокаторы, медицина
THF	1 - 0,1 мм	Децимилли- метровые	300-3000 ГГц	Гипервысокие частоты, длинноволно- вая область инфракрасного излучения	Экспериментальная «терагерцовая камера», регистрирующая изображение в длинноволновом ИК (которое излучается теплокровными организмами, но, в отличие от более коротковолнового ИК, не задерживается диэлектрическими материалами).

Классификация электромагнитных волн, охватывающая все используемые человеком диапазоны частот приведена в Таблице 6.3.

Таблица 6.3.

Классификация электромагнитных волн

Диапазон энергий (кэВ)	Диапазон длин волн	Название
$<10^{-7}$	От м до км	Радиоволны (короткие, средние, длинные волны)
$<10^{-3}$	От мкм до см	Микроволны
$<10^{-3}$	От мкм до мм	Инфракрасное излучение
0,0017 – 0,0033	От 380 до 750 нм	Видимый свет
0,0033 – 0,1	От 10 до 380 нм	Ультрафиолетовое излучение
0,11 - 100	От 0,01 до 12 нм	Рентгеновское излучение
10 - 5000	От 0, 0002 до 0,12 нм	Гамма-излучение

В серии следующих таблиц 6.4–6.7 приводятся сведения об использовании частот, жестко предписанных для выполнения определенных функций.

Таблица 6.4.

Частоты спутниковой связи

Название диапазона	Частоты	Применение
L	1,5 ГГц	Подвижная спутниковая связь
S	2,5 ГГц	Подвижная спутниковая связь
C	4 ГГц, 6 ГГц	Фиксированная спутниковая связь

X	8-12 ГГц	Фиксированная спутниковая связь для военных целей
Ku	11 ГГц, 12 ГГц, 14 ГГц	Фиксированная спутниковая связь, спутниковое вещание
K	20 ГГц	Фиксированная спутниковая связь, спутниковое вещание
Ka	30 ГГц	Фиксированная спутниковая связь, межспутниковая связь

Таблица 6.5.

Некоторые диапазоны, выделенные для гражданской авиации

Полоса частот	Описание
2182 кГц	Аварийная частота, используется только для передачи сигналов SOS (MAYDAY)
74,8 - 75,2 МГц	Маркерные радиомаяки
108 - 117,975 МГц	Радиосистемы навигации и посадки.
118 - 135,975 МГц	УКВ-радиосвязь (командная связь).
121,5 МГц	Аварийная частота, используется только для передачи сигналов SOS (MAYDAY)
328,6-335,4 МГц	Радиосистемы посадки (глиссадный канал)
960-1215 МГц	Радионавигационные системы
27 МГц	С разрешённой выходной мощностью передатчика до 10 Вт
433 МГц	Выделено 69 каналов для носимых радиостанций с выходной мощностью не более 0,01 Вт;
446 МГц	Выделено 8 каналов для носимых радиостанций с выходной мощностью не более 0,5 Вт.

Таблица 6.6.

Некоторые диапазоны радиолокационных станций

Полоса частот	Длины волн	Описание
3-30 МГц	HF, 100-10 м	Радары береговой охраны, «загоризонтные» РЛС
50-330 МГц	VHF, 6-0,9 м	Обнаружение на больших дальностях, исследования земли
1-2 ГГц	L, 30-15 см	Наблюдение и контроль за воздушным движением
2-4 ГГц	S, 15-7,5 см	Управление воздушным движением, метеорология, морские радары
12-18 ГГц	Ku, 2,5-1,67 см	Картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия
27-40 ГГц	Ka, 1,11-0,75 см	Картографирование, управление воздушным движением на коротких дистанциях, специальные радары, управляющие дорожными фотокамерами

Таблица 6.7.

Некоторые рекомендации по радиосвязи

Диапазон	Оптимальное применение	Удачное применение	Неудачное применение	Примечание
27 МГц	Дальняя связь в сельских районах при условии применения внешних антенн и мощных передатчиков	Связь между стационарными и подвижными объектами в условиях среднеэтажной и многоэтажной застройки	Внутриофисная связь и любая связь с использованием носимых радиостанций в городской застройке	Чрезвычайно высокая чувствительность к любым видам помех и к дальнему распространению сигналов
33-48 МГц	Дальняя связь в сельских районах при условии применения внешних антенн и мощных передатчиков	Связь между стационарными и подвижными объектами в условиях многоэтажной застройки	Внутриофисная связь и любая связь с использованием носимых радиостанций в городской застройке	Средняя чувствительность к любым видам помех. В условиях Крайнего Севера высокая чувствительность к дальнему распространению сигналов
137-174 МГц	Любые виды связи	Любые виды связи	---	Малая чувствительность к помехам
400-470 МГц	Любые виды связи	Любые виды связи	---	Малая чувствительность к помехам

Красочная иллюстрация общей схемы классификация радиоволн показана на рис. 14

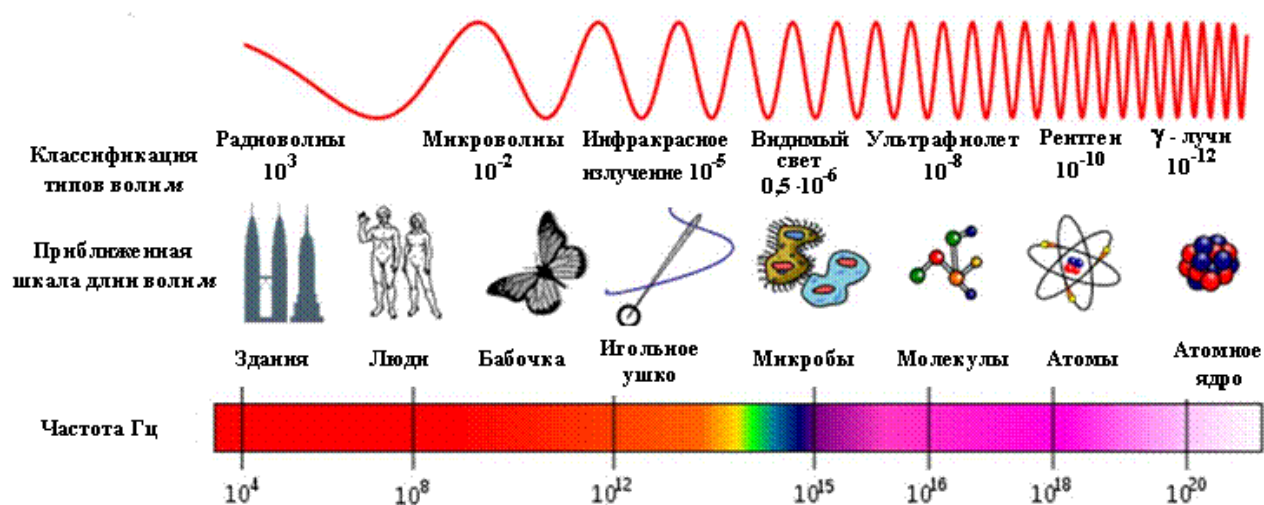


Рис. 14. Иллюстрация классификации радиоволн

7. Особенности распространения радиоволн различных диапазонах

Особенности распространения волн любых диапазонов, проистекают, в первую очередь, из свойств и характеристик почвы, атмосферы и ионосферы, а поэтому на первый план выступают вопросы зависимости их электрических характеристик - диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ от частоты исследуемого диапазона.

Одновременный учет всех этих факторов представляет собой достаточно сложную задачу. Однако в зависимости от диапазона частот роль каждого из факторов меняется. Поэтому при изучении вопросов, связанных с распространением радиоволн в конкретном диапазоне, целесообразно использовать такую электрическую модель, которая с одной стороны отражала бы все наиболее существенные для данного диапазона свойства Земли и ее атмосферы, а с другой - была бы достаточно проста для исследования.

Радиоволны могут достигать точки приема либо за счет земной (поверхностной), либо за счет пространственной волн, под последними понимают волны, отраженные или рассеянные в ионосфере (ионосферные волны), а также рассеянные на неоднородностях тропосферы. В общем случае рассмотрение особенностей распространения радиоволн по диапазонам частот следует проводить для обоих типов волн.

В последние годы особое внимание уделяется исследованию условий распространения электромагнитных волн очень низких частот (30...300 Гц) и использованию их для решения проблемы глобальной связи с аппаратами, находящимися на больших глубинах в любых точках Мирового океана. Для этих частот характерно низкое затухание в атмосфере и в морской воде. Исследования показали, что для дальностей 5-10 тыс. км оптимальными рабочими частотами соответственно являются 150 и 75 Гц.

7.1. Сверхдлинные волны (СДВ) и длинные волны (ДВ)

СДВ: Диапазон частот $f = 3 \div 30 \text{ КГц}$. Длины волн $\lambda = 100 \div 10 \text{ км}$.

ДВ: Диапазон частот $f = 30 \div 300 \text{ КГц}$. Длины волн $\lambda = 1 \div 10 \text{ км}$.

В этих диапазонах почва ведет себя практически как идеальный проводник, т.к. для нее практически всегда выполняется соотношение: $\varepsilon' \ll 60\lambda\sigma$.

Даже самой небольшой концентрации заряженных частиц в слоях ионосферы достаточно, чтобы волны этого диапазона полностью от них отражались, а поэтому ионосфера в этом диапазоне также представляет собой идеальный проводник, и в дневное время суток отражение происходит от самого нижнего слоя D , а ночью, когда он рассасывается, - от слоя E .

Основная особенность этого диапазона – высокая стабильность фазовых характеристик при распространении радиоволн, поскольку волны этого диапазона почти не проникают ни в почву, ни в ионосферу из-за их высокой проводимости.

Рассматриваемые диапазоны волн находят применение при геофизических исследованиях, для радионавигации, для связи с подводными лодками, для передачи сигнала точного времени.

Для зависимости напряженности поля $E(\alpha)$ от углового расстояния α (рис. 15) характерно наличие резко выраженного максимума. При $\alpha \rightarrow \pi$, т.е. в точке, диаметрально противоположной передатчику. Это явление называют эффектом антипода. Физически эффект антипода объясняется тем, что, распространяясь во все стороны от слабо направленной передающей антенны, плотность электромагнитной энергии вначале падает, _расходясь от антенны как от полюса, затем, пройдя в сферическом волноводе экваториальную часть, электромагнитные волны собираются как бы по меридианам на другом диаметрально противоположном полюсе, в результате чего плотность электромагнитной энергии здесь возрастает. Критическая длина волны для пространственного волновода в данном диапазоне составляет величину порядка 100 км.

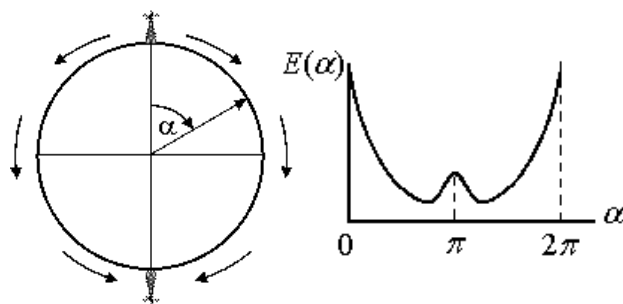


Рис. 15. К пояснению эффекта антипода

Влияние случайных флуктуаций электронной плотности ионосферы, ионосферных возмущений, а также суточных, годовых и 11-летних периодов солнечной активности на распространение сверхдлинных и длинных волн невелико. В среднем по диапазону поле в точке приема меняется не более, чем на 10-30%, причем время, в течение которого происходит это изменение, оценивается десятками минут и даже часами, а поэтому сигнал в точке приема отличается сравнительной устойчивостью и надежностью, подвергаясь в основном лишь помехам от грозových и промышленных разрядов.

Постоянство условий распространения волн этого диапазона позволяет использовать СДВ и ДВ в фазовых навигационных системах.

7.2. Средние волны (СВ)

Средние волны (СВ).

СВ: Диапазон частот $f = 300 \div 3000 \text{ КГц}$. Длины волн $\lambda = 100 \div 1000 \text{ м}$.

Особенность средневолнового диапазона заключается в том, что существует резкая зависимость условия распространения от времени суток. Средние волны применяются для радиовещания (приводные радиостанции), радионавигации, радиотелеграфной радиотелетайпной связи, в радиогеодезии

Для изучения распространения СВ уже не может быть использована модель в виде сферического волновода с идеально гладкими и отражающими стенками, как это было в случае изучения распространения СДВ и ДВ. Потери в Земле возрастают, условия для распространения земной волны ухудшаются и поэтому земная волна распространяется на расстояния, не превышающие 1000 км. Однако в диапазоне СВ Земля все еще может считаться гладкой.

Для полного отражения СВ от ионосферы требуется концентрация заряженных частиц порядка нескольких тысяч (и даже десятков тысяч) в 1 см^3 . Данная концентрация достигается в слое E . Проходя слой D , волны этого диапазона испытывают очень сильное поглощение, что практически приводит к полному затуханию радиоволны. При рассасывании слоя D ночью СВ хорошо отражаются от слоя E и достигают поверхности Земли, что позволяет осуществлять связь на расстоянии порядка 4-5 тыс. км. Ионосферные волны создают значительную напряженность поля, начиная с расстояний 100-150 км от передающей антенны. Поэтому в ночные часы в точку приема возможен приход ионосферной и поверхностной волн одновременно (рис, 16.), фаза ионосферной волны непрерывно меняется с изменением электронной концентрации ионосферы. Следствием этого является то, что в точке приема B непрерывно будет изменяться напряженность поля, что вызывает замирание принимаемого сигнала

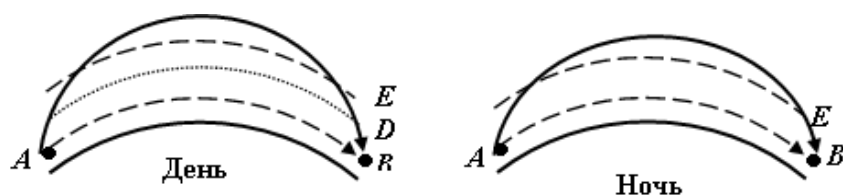


Рис. 16. К распространению средних волн

На больших расстояниях, за пределами действия земной волны, причиной замираний является интерференция ионосферных волн, пришедших в точку B различными путями.

Таким образом, в диапазоне СВ днем возможна связь на расстояниях до 200-500 км, а в ночное время радиосвязь может поддерживаться на расстояниях до 4-5 тысяч км.

7.3. Короткие волны.

Диапазон частот $f = 3 \div 30 \text{ МГц}$. Длины волн $\lambda = 10 \div 100 \text{ м}$.

В этом диапазоне Земля является плохим проводником. Почва: $\varepsilon' \approx 60\lambda\sigma$. Для отражения волн этого диапазона требуется существенно более высокая концентрация электронов, что имеет место в слое F . Картина распространения волн дневное и ночное время суток выглядит следующим образом:

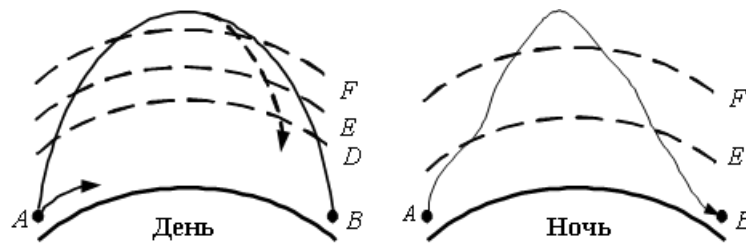


Рис. 17. К распространению коротких волн

Земная волна быстро затухает из-за большого поглощения в почве. При разумных мощностях передачи дальность распространения этих волн составляет десятки километров.

В слоях D и E ионосферы происходит поглощение волны. Отражающим слоем является слой F . В ночное время слой D рассасывается, слой E мало изменяется, а слой F опускается немного ниже. Ионосферная волна этого диапазона испытывает значительно меньшее затухание, чем волны СВ.

Если для связи днем, например, использовать частоту $f_{\text{день}} = 15 \text{ МГц}$, то для связи в ночное время суток из-за того, что электронная концентрация уменьшается, частоту $f_{\text{ночь}}$ следует уменьшить. Если сохранить в ночное время дневную частоту $f_{\text{день}}$, то волна затухнет, поэтому требуется устанавливать расписание смены волн. $f_{\text{НПВЧ}}$ – наименьшая принимаемая высокая частота.

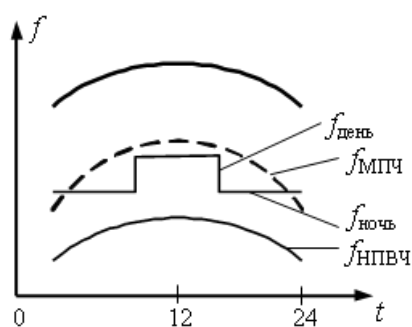


Рис. 18. Зависимость условия связи от времени суток.

Для коротковолнового диапазона характерно наличие двух особенностей: сильная зависимость условий связи от времени суток и наличие мертвых зон приема, механизм возникновения которых объясняется следующим образом.

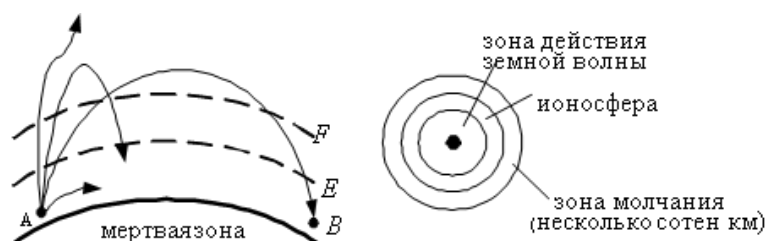


Рис. 19. Распространение волны в коротковолновом диапазоне.

Земная волна распространяется на небольшое расстояние (порядка 150 км).

Ионосферная волна отражается от слоя F . Для того, чтобы ионосферная волна, отражаясь от слоя F , попала на земную поверхность на расстоянии 50 и более километров, угол падения на ионосферу должен быть достаточно мал. Ясно, что начиная с какой-то частоты, волна, падая на ионосферу под этим углом от ионосферы не отразится, а стало быть отраженного луча не будет. Таким образом, вокруг передатчика создаются три область: зона действия земной волны, затем участки земной поверхности, в которую не попадает ни земная, ни ионосферная волна (мертвая зона). В третью зону приходят волны, отраженные от ионосферы, а также волны многократного отражения ионосфера-земля-ионосфера-земля и т.д. Эта зона может простирается до

противоположной точки земного шара. Поскольку отражение радиоволн напрямую зависит от такой неустойчивой характеристики как концентрация электронов, связь на КВ подвержена непрерывным флуктуациям.

Для борьбы с зоной молчания нужно увеличивать мощность передатчика или перейти на более низкую рабочую частоту.

7.4. Ультракороткие волны

Диапазон частот $f = 30 \div 300 \text{ МГц}$. Длины волн $\lambda = 10 \div 1 \text{ м}$.

Для распространения УКВ характерно, прежде всего, отсутствие обычной земной волны, так как для радиоволн, соответствующих этому диапазону, ионосфера может считаться радиопрозрачной, УКВ пронизывают её с незначительными поглощениями, причем они уменьшаются с возрастанием частоты, вследствие чего эти волны пригодны для связи через ионосферу. В космическом пространстве и стратосфере поглощение УКВ совсем ничтожно. Оно становится заметным лишь в тропосфере и земной поверхности. Основные явления, которые приходится учитывать при распространении ультракоротких волн в тропосфере и ионосфере - это их рефракция и рассеяние на неоднородностях, а также изменение их фазовой и групповой скорости.

Ультракороткие радиоволны плохо дифрагируют на больших по сравнению с волной препятствиях и хорошо от них отражаются, что позволяет использовать их в радиолокации.

Связь на УКВ фактически производится в пределах прямой видимости, а на большие расстояния путем ретрансляции сигнала.

При распространении УКВ земную поверхность в пределах прямой видимости можно считать плоской.

В ряде прикладных задач удастся использовать УКВ диапазон для передачи информации на значительные расстояния, существенно превышающие расстояние прямой видимости. В основе лежит возможность

приема сигнала, возникающего при отражении УКВ радиоволн от метеорных следов, постоянно возникающих в атмосфере.

Земная атмосфера непрерывно бомбардируется большим количеством частиц, имеющих небольшую массу. Считают, что общее число всех частиц, входящих в земную атмосферу в течение суток, оценивается величиной порядка 10^{10} штук, а общая масса их равна приблизительно одной тонне.

Когда метеоритные частицы входят в область ионосферы, лежащую на высотах 80-120 км над поверхностью Земли, они сильно нагреваются в результате столкновений с молекулами воздуха. Атомы, испаряющиеся с поверхности частиц, также сталкиваются с молекулами воздуха. Эти столкновения и приводят к ионизации газа.

Ионизированные следы метеоритов содержат много свободных электронов, их количество на 1 м следа может иметь значение от 10^{10} до 10^{16} эл/м. Длина следа составляет многие километры.

Диаметр метеорного следа в момент возникновения составляет несколько сантиметров, затем след начинает расширяться вследствие диффузии электронов. Свободные электроны рассеивают любые радиоволны, падающие на их след. Сроки существования следов колеблются от долей секунд до нескольких секунд. Это и определяет способ передачи информации, сводящийся к предварительному ее накоплению в запоминающих устройствах с последующей ускоренной передачей в период возникновения метеорных вспышек. Относительное время использования таких линий связи колеблется около 10 % в сутки.

Подобные системы связи могут обеспечить надежную передачу информации в диапазоне 30-50 МГц на расстояния до 2000 км при полосе пропускания в 30 кГц.

Рис. 20 дает наглядную картинку распространения коротких и ультракоротких волн.



Рис. 20. Наглядное представление распространения радиоволн КВ и УКВ диапазонов

Ряд обобщенных сводных сведений, касательно ДВ, СВ, КВ и УКВ приведены в Таблице

Диапазон	Дальность распространения	Антенны	Уровень помех	Поглощение в атмосфере
ДВ	Поверхностная волна – до 3000 км Пространственная волна – до 20000 км	Громоздкие	Высокий	Слабое
СВ	Поверхностная волна – до 3000 км Пространственная волна – до 20000 км			
КВ	Поверхностная волна – до 20 км Пространственная волна – любое расстояние			
УКВ	Прямая видимость	Компактные	Низкий	Сильное

7.5. Дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волн

Диапазон частот $f=3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^5$ МГц. Длины волн $\lambda=1 - 10^{-3}$ м.

Как было показано ранее, радиоволны этого диапазона ионосферой не отражаются и не рассеиваются, а поэтому при рассмотрении вопросов

распространения волн рассматриваемого диапазона ионосфера может не учитываться.

Дифракция на таких больших частотах выражена очень слабо и вследствие этого земные волны могут распространяться практически не дальше прямой видимости. Дальнее распространение волн этого диапазона происходит, главным образом, за счет рефракции и рассеяния на неоднородностях тропосферы. Механизм этого процесса такой как и для метровых волн.

Дециметровые и сантиметровые ($\lambda = 5\text{см}$) волны практически не испытывают никакого поглощения в тропосфере, которая может считаться для них абсолютно радиопрозрачной, заметное поглощение в водяных парах наблюдается на волне 1,35 см и короче.

При прохождении миллиметровых волн через атмосферу основными причинами затухания волны является молекулярный кислород и гидрометеоры в виде дождя тумана, снега града. В диапазоне от 1 до 10 мм имеются несколько зон, где затухание выражено слабо: это области 1,2 мм, 2мм, 3 мм и. наконец, наиболее часто применяемая область $\lambda = 8,6\text{ мм}$

Следует иметь в виду, что приведенная зависимость соответствует температуре 15° С и влажности 60 %. С изменением этих параметров затухание существенно изменяется. Соответствующие зависимости приводятся в литературе.

В условиях дождя и тумана волны миллиметрового диапазона сильно поглощаются и практически распространяться не могут.

Волны дециметрового и сантиметрового диапазонов нашли широкое применение в радиолокации, связи, телевидении, космической связи и т.д. Волны миллиметрового диапазона пока находят ограниченное применение (в радиолокации, в технике связи в условиях волноводного распространения, в открытом космосе).

7.6. Волн оптического диапазона

Длины волн $\lambda = 0,1 \text{ мм} - 0,01 \text{ мкм}$

Область оптических волн охватывает инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый поддиапазоны). Оптическое излучение возникает при изменении энергии внешних электронов атомов и молекул вещества. Так как внутренняя энергия атомов и молекул может иметь только определенные дискретные значения, то излучение, обусловленное ее изменением, носит также дискретный характер. Излучение квантами наряду с волновыми свойствами проявляет и свойства потока частиц фотонов. Поэтому в области оптического и более короткого гамма-излучения чаще говорят не о волнах а об инфракрасных, видимых, ультрафиолетовых и гамма-лучах. Следует заметить, что в настоящее время радиоэлектроникой освоен еще не весь оптический диапазон. Наиболее интенсивно исследуются и наибольшее практическое применение получили пока видимые лучи (0,75 - 0,4 мкм) и небольшая часть ближних инфракрасных лучей , (0,76 - 1,5 мкм). Дальние инфракрасные лучи освоены пока слабо. Это объясняется малой энергией кванта волн этого диапазона, слабой эффективностью оптических приборов (лазеров, фотоприемников), а также почти полным отсутствием "окон прозрачности" атмосферы в этом диапазоне.

Характерной особенностью видимых и инфракрасных волн при распространении в атмосфере является их сильное ослабление. Причем это ослабление существенно различно в чистой атмосфере и в атмосфере при наличии в ней облаков и других метеообразований. В чистой атмосфере ослабление обусловлено рассеянием видимых и инфракрасных лучей на молекулах газов и водяного пара, а также резонансным (селективным) поглощением отдельных волн в них.

Конденсация водяных паров в атмосфере, ее замутненность и запыленность частицами пыли индустриального, космического и другого происхождения также вызывает рассеяние оптических волн. Обычно размер частиц существенно превышает длину волны, плотность их в атмосфере не

остается постоянной, расчет коэффициента ослабления затрудняется и дает большие погрешности (ошибки), и поэтому для его оценки пользуются экспериментальными данными.

Помимо рассеяния на молекулах газов и водяных парах чистой атмосферы наблюдается селективное поглощение волн. Селективное поглощение в газах (кислороде, углекислом газе, озоне и т.п.) и водяных парах оказывается настолько сильным, что оно практически полностью исключает передачу информации на отдельных волнах, создавая, таким образом, окна прозрачности атмосфер на других волнах.

Из изложенного следует, что оптические системы связи целесообразно применять только в чистой атмосфере и в районах, где гидрометеорообразования являются редкими явлениями. Особенно перспективно применение оптических систем связи в свободном пространстве, где поглощение оптических лучей практически отсутствует и где связь может быть обеспечена на расстояниях десятков световых лет.

Применение волн рассматриваемого диапазона для целей связи имеет существенное преимущество, так как принципиально возможно осуществлять передачу большого количества информации, поскольку их спектр достигает величины порядка 10^9 МГц.

В последние годы в связи с бурным развитием лазерной техники оптические волны, в особенности область инфракрасного излучения, получили широкое применение для создания оптических систем связи, навигации, локации, оптической радиометрии и в решении ряда других задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое разнообразие задач, решаемых радиоэлектронными средствами, требует освоения новых областей спектра электромагнитных волн. При этом освоение идет как в область более коротких, так и в область более длинных волн.

Освоение все более коротких волн позволяет передавать большие объемы информации, повышать разрешающую способность

радиоизмерительных систем, уменьшать габариты и весовые параметры антенных устройств. В силу этих причин понятна целесообразность изучения еще слабо изученных пока миллиметровых и субмиллиметровых волн для применения в радиорелейных, радиолокационных системах, а также для связи наземных станций с летательными аппаратами.

Необходимо дальнейшее изучение возможностей использования волн оптического диапазона.

Предстоит изучить использование волн рентгеновского излучения для дальнометрии и других целей.

Обеспечение глобальной навигации и глобальной связи через толщу морской воды требует дальнейшего изучения особенностей распространения электромагнитных волн сверхнизких частот (СНЧ). Это далеко не полный перечень проблем, возникающих при расширении использования спектра электромагнитных волн и внедрении их в технику связи, радиолокации и радионавигации.

Диапазон	Дальность распространения	Антенны	Уровень помех	Поглощение в атмосфере
ДВ	Поверхностной волной - до 3 тыс. км, пространственной - до 20 тыс. км	Громоздкие 	Высокий 	Слабое 
СВ	Поверхностной - до 1500 км, пространственной - до 4000 км			
КВ	Пространственной - на любое расстояние			
УКВ	Прямая видимость	Компактные	Низкий	Сильное

Электромагнитные волны разных частот отличаются друг от друга.

В настоящее время все электромагнитные волны разделены по длинам волн (и, соответственно, по частотам) на шесть основных диапазонов: радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи, γ -излучение

ОГЛАВЛЕНИЕ

3.1. Основы радионавигации

3.1.1. Общие подходы к решению задач навигационного обеспечения воздушного судна

3.1.2. Основные понятия, используемые в радионавигации

3.2. Традиционное навигационное оборудование, используемое для навигации воздушных судов

3.2.1. Автоматический радиокompас

3.2.2. Пилотажно-навигационный комплекс

3.2.3. Радиотехнические системы дальней и ближней навигации

3.2.4. Радиомаяки

3.3. Спутниковые радионавигационные системы

3.3.1. Причины перехода к спутниковым радионавигационным системам

3.3.2. История развития СРНС

3.3.2.1. История развития СРНС ГЛОНАСС

3.3.2.2. История развития СРНС GPS

3.3.3. Требования СРНС

3.3.4. Принципы функционирования СРНС

3.3.5. Наземный комплекс управления

3.3.6. Совместное использование систем ГЛОНАСС и GPS

3.1. Основы радионавигации

3.1.1. Общие подходы к решению задач навигационного обеспечения воздушного судна

Любая навигационная задача сводится к известной из курса элементарной геометрии задаче нахождения по трём элементам треугольника всех остальных его элементов. В самолетной радионавигации вершинами таких треугольников могут выступать наземные радиомаяки, широкоэмитательные радиостанции, спутники и другие объекты.

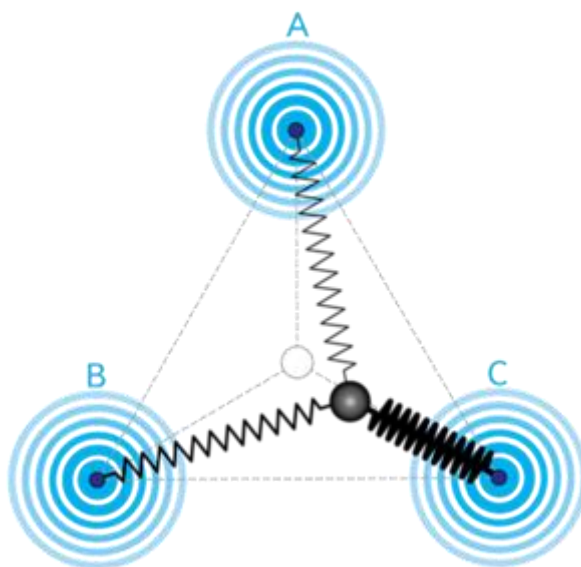


Рис.3.1. Решение навигационной задачи

Любой человек, передвигающийся пешком или при помощи своего личного транспорта в незнакомой местности, решает проблему определения своего местоположения различными способами или комбинацией нескольких способов.

Перечислим их:

1. По наземным ориентирам. К этим объектам могут быть отнесены выделяющиеся здания, реки, возвышенности, указатели и т.д. Роль подобных ориентиров для воздушного судна, летящего иногда на большой высоте,

выполняют наземные радиомаяки. Эти объекты делятся на курсовые, глиссадные и маркерные в зависимости от этапа полёта самолёта (полёт по трассе или заход на посадку).

2. По географическим координатам (широта-долгота). Эту задачу решают современные навигационные приёмники, находящиеся на борту воздушного судна.

3. Не имея видимых ориентиров, например в лесу или в условиях ночи, можно воспользоваться обычным компасом. Самолёт также оснащён автоматическим радиокompасом для определения направления на наземную радиостанцию.

Второй метод определения местоположения самолета опирается на «счисление пути» при помощи бортовой вычислительной машины. В этом случае производится непрерывное измерение ускорений (по трем пространственным координатам) с последующим их интегрированием во времени.

3.1.2. Основные понятия, используемые в радионавигации

В этом разделе приводятся основные понятия, используемые для решения задачи определения местоположения воздушного судна.

Магнитным курсом (МК) называется угол, заключённый между северным направлением магнитного меридиана, проходящего через самолёт, и продольной осью самолёта.

Истинным курсом (ИК) называется угол, заключённый между северным направлением истинного меридиана, проходящего через самолёт, и продольной осью самолёта.

Компасным курсом (КК) называется угол, заключённый между северным направлением компасного меридиана, проходящего через самолёт, и продольной осью самолёта.

Линия заданного пути (ЛЗП) - прямая между соседними точками маршрута.

Заданным путевым углом (ЗПУ) называется угол, заключённый между северным направлением меридиана, и линией заданного пути.

Угол сноса (УС) - угол, заключённый между продольной осью самолёта, и линией пути.

Азимут (А) ориентира называется угол, заключённый между северным направлением меридиана, проходящего через данную точку, и направлением на наблюдаемый ориентир.

Магнитным пеленгом радиостанции (МПР) называется угол, заключённый между северным направлением магнитного меридиана, и направлением на радиостанцию.

Курсовой угол радиостанции (КУР) называется угол, заключённый между продольной осью самолёта и направлением на радиостанцию. КУР отсчитывается от продольной оси самолёта до направления на радиостанцию по ходу часовой стрелки от 0 до 360°.

3.2. Традиционное навигационное оборудование, используемое для навигации воздушных судов

3.2.1. Автоматический радиокompас

Автоматический радиокompас – это бортовой радиопеленгатор, предназначенный для навигации летательных аппаратов по сигналам наземных радиостанций путём непрерывного измерения курсового угла радиостанции (КУР). *Курсовой угол радиостанции* — угол, заключённый между продольной осью воздушного судна и направлением на радиостанцию, отсчитываемый по часовой стрелке (рис. 3.2.)

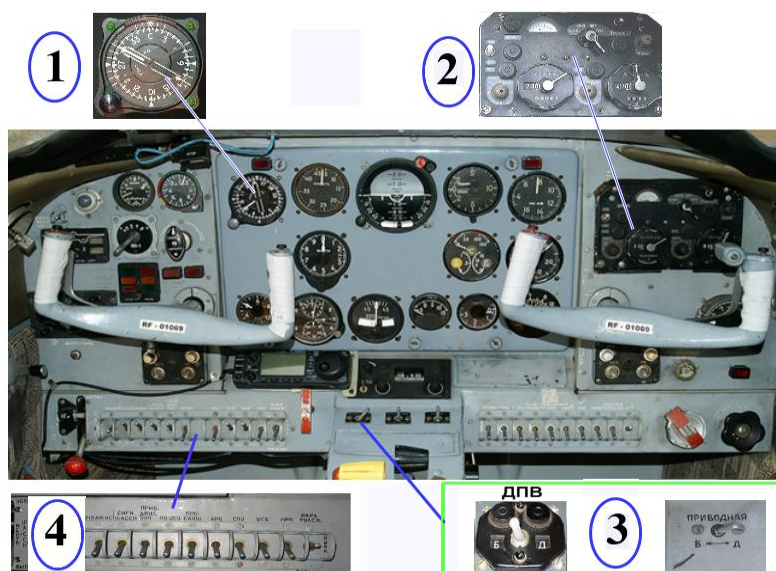


Рис.3.2. Автоматический радиокompас

Радиокompас называется автоматическим потому, что после настройки на несущую частоту радиостанции он без участия человека (оператора) непрерывно измеряет значение КУР. КУР отображается на стрелочном или цифровом индикаторе, а также может передаваться в бортовую навигационную систему.

Предназначен для полёта по маршруту, вывода самолёта на аэродром посадки, обеспечения предпосадочного манёвра и выполнения неточного захода на посадку.

Зона его действия для обеспечения полётов по трассам 150 км, для обеспечения полётов в зоне аэродрома 50 км.

Диапазон рабочих частот от 190 до 1750 кГц.

История создания отечественного радиокompаса:

1) 27 июля 1920 года – первое в мире применение радиокompаса для авиационной навигации.

2) Весной 1935 года в НИИ ВВС проходил испытание радиокompас, созданный инженером Николаем Александровичем Карбанским, в серийный выпуск этот радиокompас не пошёл.

3) Первые советские радиоконпасы АРК-5 начали выпускаться во время Великой Отечественной войны на базе американской разработки (радиоконпас бомбардировщика В-29).

Точность определения курсового угла радиостанции автоматическим радиоконпасом зависит от условий распространения радиоволн, на которые влияют рельеф местности, наземные сооружения (различные строения, мачты), элементы конструкции летательного аппарата, отражения радиоволн от земной поверхности и ионосферы.

Все эти факторы искажают электромагнитное поле, что приводит к отклонению от направления на радиостанцию, внося таким образом ошибку в определение КУР. Определить ошибки пеленгования, вызванные неизменными препятствиями (рельеф, сооружения), и учесть их можно только по результатам практических измерений на местности. Некоторые ошибки носят сезонный характер и зависят от изменений электрических параметров почвы и местных предметов и вызываются изменением погодных условий.

Также при определении КУР следует учитывать явления, характерные для распространения радиоволн средневолнового диапазона: береговой эффект, горный эффект и ночной эффект.

Ошибки, обусловленные береговым эффектом, связаны с рефракцией поверхностных волн при их распространении через границу раздела двух сред: суши и моря, в результате чего появляется ошибка Δ между истинным КУР и текущим отсчётом радиоконпаса (ОРК).

Береговой эффект

Ошибки, обусловленные береговым эффектом, связаны с изменением направления (рефракцией) волн при их распространении через границу раздела двух сред: суши и моря, в результате чего появляется ошибка Δ между истинным КУР и текущим отсчётом радиоконпаса (ОРК). Рефракция будет тем больше, чем меньше угол между береговой линией и направлением прихода радиоволн к береговой линии. Так, например, при острых углах

встречи волны с береговой линией ошибка радиопеленгования может достигать 6—8°. Наиболее ощутимое влияние берегового эффекта будет наблюдаться в непосредственной близости от береговой черты. По мере удаления от неё фронт волны постепенно выравнивается, и ошибка в определении пеленга становится незначительной.

Горный эффект

Сущность горного эффекта состоит в том, что электромагнитные волны, отражаясь от неровностей земной поверхности (гор, холмов), накладываются на поле прямой волны радиостанции (интерференция) и искажают его.

Величина ошибок автоматического радиокompаса, вызванная горным эффектом, зависит от высоты гор и расстояния до них, длины волны пеленгуемой радиостанции, истинной высоты полёта летательного аппарата.

При высоте гор 300—1500 м ошибка сказывается на расстоянии 8—10 км от горы, при высоте гор 1500—4000 м сказывается на расстояниях 20—40 км. Например, при полёте над горной долиной ниже высоты окружающих хребтов ошибка пеленгования не превышает 5° при пеленговании радиостанции, расположенной в той же долине, на расстоянии не менее 10 км от гор. В других условиях, особенно при высоте полёта менее 300 м, ошибки определения КУР могут достигать величины 90°. Наибольшие ошибки наблюдаются в том случае, если летательный аппарат находится между радиостанцией и наивысшей точкой рельефа.

Для повышения точности измерения КУР в горной местности используются радиоволны с более короткой длиной волны, а при полётах на высотах менее 500 м при навигации следует брать среднее показание по индикатору КУР.

По назначению и диапазону частот автоматические радиокompасы делятся на две группы – средневолновые (навигационные) и аварийные (поисковые), используемые при поисково-спасательных работах. Диапазон частот поискового АРК находится в пределах 100-150 МГц.

В СССР и России использовались и используются следующие типы автоматических радиокомпасов: АРК-5, АРК-9, АРК-10, АРК-11, АРК-15М, АРК-19, АРК-22, АРК-25, АРК-32, АРК-35, АРК-40, АРК-У2 (аварийный), АРК-УД (аварийный).

3.2.2. Пилотажно-навигационный комплекс

К пилотажно-навигационным приборам относится приборное оборудование, помогающее летчику вести самолет. В зависимости от назначения авиационные бортовые приборы делятся на пилотажно-навигационные, приборы контроля работы авиадвигателей и сигнализационные устройства. Навигационные системы и автоматы освобождают пилота от необходимости непрерывно следить за показаниями приборов. В группу пилотажно-навигационных приборов входят указатели скорости, высотомеры, вариометры, авиагоризонты, компасы и указатели положений самолета. В современных бортовых приборах все больше информации выносится на общий индикатор. Комбинированный (многофункциональный) индикатор дает возможность пилоту одним взглядом охватывать все объединенные в нем индикаторы. Успехи электроники и компьютерной техники позволили достичь большей интеграции в конструкции приборной доски кабины экипажа и в авиационной электронике. Полностью интегрированные цифровые системы управления полетом дают пилоту лучшее представление о пространственном положении и местоположении самолета, чем это было возможно ранее.

Новый тип комбинированной индикации - проекционный - дает пилоту возможность проецировать показания приборов на лобовое стекло самолета, тем самым совмещая их с панорамой внешнего вида.

Кратко остановимся на каждом из основных приборов.

Указатель пространственного положения представляет собой гироскопический прибор, который дает пилоту картину внешнего мира в качестве опорной системы координат. На указателе пространственного

положения имеется линия искусственного горизонта. Символ самолета меняет положение относительно этой линии в зависимости от того, как сам самолет меняет положение относительно реального горизонта.

Планный навигационный прибор (ПНП) показывает курс, отклонение от заданного курса, пеленг радионавигационной станции и расстояние до этой станции. ПНП представляет собой комбинированный индикатор, в котором объединены функции четырех индикаторов - курсоуказателя, радиомагнитного индикатора, индикаторов пеленга и дальности.

Указатель воздушной скорости. При движении самолета в атмосфере встречный поток воздуха создает скоростной напор в трубке Пито, закрепленной на фюзеляже или на крыле. Воздушная скорость измеряется путем сравнения скоростного (динамического) напора со статическим давлением.

Вариометр необходим для поддержания постоянной скорости подъема или снижения. Как и высотомер, вариометр представляет собой, в сущности, барометр. Он указывает скорость изменения высоты, измеряя статическое давление. Имеются также электронные вариометры. Вертикальная скорость указывается в метрах в минуту.

Высотомер определяет высоту над уровнем моря по зависимости атмосферного давления от высоты. Это, в сущности, барометр, проградуированный не в единицах давления, а в метрах. Данные высотомера могут представляться разными способами - с помощью стрелок, комбинаций счетчиков, барабанов и стрелок, посредством электронных приборов, получающих сигналы датчиков давления воздуха.

Многие виды летной работы сопряжены с полетами на малых высотах: это, выполнение полицейских функций и миссий по сопровождению, сельскохозяйственные работы, тушение пожаров. В других случаях (например, мониторинг земной поверхности) от пилота требуется предельно точное следование выбранной траектории, обеспечение посадки и взлета в

незнакомой местности (спасательно-эвакуационные работы). В таких условиях управляемое столкновение с подстилающей поверхностью – одна из главных причин фатальных летных происшествий. Функция предупреждения о столкновении с поверхностью является важнейшей составляющей обеспечения безопасности полета, выполняемой пилотажно-навигационным комплексом.

На экране дисплея пилотажно-навигационного комплекса отображается трехмерный рельеф подстилающей поверхности. Используя цифровую карту рельефа местности (ЦКРМ), комплекс делает возможным инструментальный полет с огибанием рельефа и обходом препятствий. Функция предупреждения реализована в виде линии, определяемой автоматически, сообразуясь с рельефом и параметрами полета.

На рис.3.3 показан навигационный приёмник, установленный на борту воздушного судна.



Рис.3.3. Навигационный приёмник

3.2.3. Радиотехнические системы дальней и ближней навигации

Радиотехническая система ближней навигации (РСБН) – это система навигационного обеспечения полётов авиации. Радиомаяки РСБН позволяют получить информацию об азимуте и наклонной дальности до перемещающегося объекта. Бортовое оборудование воздушного судна посылает запрос, от наземного оборудования получает ответ, по величине задержки ответа относительно запроса определяется дальность.

Радиомаяк излучает постоянный направленный сигнал от вращающейся антенны; когда направление антенны совпадает с направлением на север, излучается дополнительный сигнал от все-направленной антенны. Таким образом, зная постоянную скорость вращения направленной антенны и время между направленным и все-направленным сигналами, можно вычислить



текущее направление принимающего сигнал объекта. На рис. 3.4. представлен пример радиотехнической системы ближней навигации (РСБН).

Рис. 3.4. Радиотехническая система ближней навигации

Радиотехнические системы ближней навигации имеют ограниченную дальность действия. Они не могут быть использованы при полетах на дальние расстояния, полетах над океанами. Значительные затруднения в обеспечении полетов средствами ближней навигации имеются при полетах над тундрой, тайгой и горной местностью. В этих случаях местоположение ВС может быть определено штурманом с помощью радиотехнических систем дальней навигации. В этих системах использованы свойства сверхдлинных волн распространяться вдоль поверхности земли на значительные расстояния.

Как уже было сказано ранее, для определения местоположения ВС нужно иметь две линии положения (если задача на плоскости). Напомним, что в системе РСБН в качестве линий положения использованы окружность и радиус-вектор. В системах дальней навигации использованы линии положения в виде гипербол, поэтому эти РСДН еще называются гиперболическими. Эти РСДН на борту ВС измеряют разность расстояний до двух наземных маяков системы РСДН. Известно, что геометрические места точек, для которых разность расстояний до фокусов одинакова, образуют гиперболу.

Места расположения маяков РСДН нанесены на штурманскую карту, поэтому по полученной разности расстояний сразу строится одна линия положения - гипербола. Вторая гипербола получается аналогично с той только разницей, что вычисляется разность расстояний между самолетом до одной из двух предыдущих станций и третьей станцией, расположенной в другом районе Земли. Таким образом, на карте штурман строит две гиперболические линии положения, пересечение которых дает на плоскости точку нахождения самолета. Разности расстояний в системе РСДН измеряются по разности времён прихода сигналов от пары наземных станций. Одновременно при определении местоположения ВС надо использовать три станции, которые излучают сигналы с очень высокой степенью синхронности, что необходимо для получения требуемой точности определения местоположения самолета.

Для обеспечения синхронной работы одна из трех наземных станций работает как ведущая. Несмотря на внешнюю простоту метода, техническая реализация работы наземной системы достаточно сложна. Существуют несколько типов РСДН систем «Лоран», «Омега» и др.

3.2.4. Радиомаяки

Радиомаяк — передающая радиостанция, излучающая радиосигналы, используемые для определения координат различных объектов (или направления на них), в основном, самолётов либо для определения местонахождения самого радиомаяка.

Радиомаяки бывают угломерные и дальномерные (чаще комбинированные— угломерно-дальномерные). Угломерные (азимутальные) радиомаяки предназначены только для определения направления, а нахождение координат становится возможным после специальных вычислений на основе информации о направлении не менее, чем на два радиомаяка.

По назначению радиомаяки делятся на следующие виды:

- 1) Курсовые радиомаяки – предназначены для задания курсов в горизонтальной или вертикальной плоскости;
- 2) Маркерные радиомаяки – предназначены для маркировки пунктов, важных в навигационном отношении (например, контрольных пунктов при заходе самолётов на посадку);
- 3) Аварийные (поисково-спасательные) радиомаяки – радиостанции, по сигналам которым спасательные службы производят поиск. Современные аварийные маяки, для повышения эффективности поиска, могут передавать в своём сигнале собственные координаты, полученные со средств бортового оборудования или со спутниковых систем.

На рис. 3.5. показан пример радиомаяка.



Рис. 3.5. Радиомаяк

3.3. Спутниковые радионавигационные системы

3.3.1. Причины перехода к спутниковым радионавигационным системам

В последние годы наметилась тенденция к переходу к решению навигационных задач, стоящих перед воздушным судном, к спутниковым радионавигационным системам

1983г. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) создала Комитет по будущим аэронавигационным системам (FANS), задачей которого являлось определение концепции развития систем навигации, связи и наблюдения на 25 лет.

1988г. Конец работы FANS. Его рекомендации были положены в основу

развития систем государствами - членами ИКАО.

Был сделан вывод: потребности гражданской авиации (ГА) в будущем наиболее полно могут быть удовлетворены только системами, использующими ИСЗ.

Причинами этого являются следующие основные факторы:

- 1) высокая точность;
- 2) управление из единого центра;
- 3) сравнительно лёгкая модернизация оборудования.

Помимо этого мы все знаем, что обзор обстановки сверху всегда лучше, чем снизу, а спутниковые радионавигационные системы (СРНС) дают такую возможность.

Пример СРНС приведён на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Пример СРНС

3.3.2. История развития СРНС

3.3.2.1. История развития СРНС ГЛОНАСС

4 октября 1957г. был запущен первый искусственный спутник Земли (ИСЗ). Измерения доплеровского сдвига частоты передатчика этого ИСЗ на пункте наблюдения с известными координатами позволили определять параметры движения этого спутника. Возникла обратная задача: по измерениям того же доплеровского сдвига при известных координатах ИСЗ определять координаты пункта наблюдения. Возникло первое научно-обоснованное предложение об использовании ИСЗ для навигации.

В 1958-1959гг. происходило существенное развитие научных основ назоорбитальных СРНС. Основное внимание уделялось вопросам повышения точности навигационных определений, определений глобальности, круглосуточности применения и независимости от погодных условий.

В 1963г. проводились опытно-конструкторские работы над первой отечественной низкоорбитальной системой "Цикада".

27.11.1967г. был выведен на орбиту первый навигационный отечественный спутник ("Космос-192").

В дальнейшем спутники системы "Цикада" были дооборудованы приемной измерительной аппаратурой (ПИА) обнаружения терпящих бедствие объектов.

В 1982г. был произведён запуск спутника "Космос-1413".

В 1995г. СРНС ГЛОНАСС была развёрнута до её штатного состава 24 КА.

Основным заказчиком и ответственным за испытания являются Военно-космические силы (ВКС) РФ (сейчас РВСН- ракетные войска стратегического назначения).

Основными направлениями дальнейших работ является:

1) модернизация СРНС ГЛОНАСС на основе модернизированного спутника ГЛОНАСС-М с повышенным гарантийным сроком службы (5 и

более лет вместо 3 лет) с более совершенными техническими характеристиками, что позволит повысить надежность и точность системы в целом;

2) работы по внедрению технологии спутниковой навигации в отечественную экономику, науку и технику;

3) развитие сотрудничества с различными международными организациями и фирмами в области расширения использования возможностей навигационной системы ГЛОНАСС для широкого круга потребителей;

4) решение вопросов, связанных с использованием совместных навигационных полей систем ГЛОНАСС и GPS в интересах широкого круга потребителей мирового сообщества;

5) поиск единых подходов к вопросу предоставления услуг мировому сообществу со стороны космических навигационных систем;

6) согласование опорных систем координат и систем шкал времени;

7) выработка мер по недопущению использования возможностей космических навигационных систем в интересах террористических режимов.

3.3.2.2.История развития GPS

После запуска первого ИСЗ была поставлена задача слежения за советскими ИСЗ посредством приема его сигнала на наземном пункте с известными координатами и дальнейшего расчета параметров движения спутника.

В 1960г. была проведена разработка атомных часов. Для целей навигации используется сеть точно синхронизированных передатчиков, передающих кодированные сигналы. Измерение приемником соответствующих временных задержек позволяло рассчитывать координаты приемника.

31.05.1967г. - этот принцип впервые реализован с помощью запуска Военно-морскими силами (ВМС) США спутника TIMATION-I.

30.09.1969г. - запуск спутника TIMATION=II-82B.

Военно-воздушные силы (BBC) США в 1964г. начали программу разработки и испытания возможностей использования для целей местоопределения сигналов, имеющих PRN коды.

В 1973г. - программы BBC и BMC США были объединены в общую Навигационно-Технологическую программу "Навстар-GPS", спутник TIMATION-III переоборудован в общий КА NTS-1, запущенный 14 июля 1974г. с кварцевым и рубидиевым стандартами частоты; за ним последовало создание КА NTS-2 и NTS-3 соответственно с цезиевым и водородным стандартами.

На 1 этапе программы была проведена оценка общей концепции и были разработаны навигационные космические аппараты (НКА) Блок-I.

На 2 этапе программы был проведён запуск первых 4 НКА (1978г.)

В 1995г. - система практически развернута (26 НКА Блок-II и 2 НКА нового поколения Блок-IIR), запуск которых был осуществлён 22.7.1997 и 7.10.1999.

3.3.3. Требования к СРНС

При создании СРНС возникают две основные проблемы:

- 1) проблема взаимной синхронизации спутниковых шкал времени с точностью до млрд. долей секунды (наносекунд);
- 2) высокоточное определение и прогнозирование параметров орбит навигационных спутников.

Следует отметить, что рассинхронизация в 10нс вызывает дополнительную погрешность в определении местоположения потребителя до 10-15м.

Для иллюстрации этого приведём следующий пример. Поезд идёт из пункта А с постоянной скоростью. По дороге машинист передал время выезда из пункта А, которое показывали его часы. Но, если это время было неточное,

то оно в итоге приводит к ошибке определения расстояния внешним наблюдателем.

Для решения этой проблемы:

- 1) устанавливают на космические аппараты (КА) высокостабильные бортовые цезиевые стандарты частоты;
- 2) создают наземные средства сличения шкал с погрешностью 3-5 нс.

Для решения второй проблемы создаются совершенные методы прогнозирования параметров орбит навигационных спутников..

Требованиями, обусловленными использованием СРНС в интересах местоопределения и навигации объекта, являются требования к точностным характеристикам, например, к СКО определения навигационных параметров, и к показателям надежности навигационного объекта (НО):

- 1) доступности (вероятность работоспособности РНС в процессе выполнения той или иной задачи);
- 2) целостности (вероятность выполнения отказа в течении времени равного или менее заданного);
- 3) непрерывности обслуживания (вероятность работоспособности системы в течении наиболее ответственных отрезков времени движения).

3.3.4. Принципы функционирования СРНС

Определение. Основное назначение СРНС второго поколения ГЛОНАСС – глобальная оперативная навигация ВС, т.е. любой ВС, оснащенный навигационной аппаратурой потребителей (НАП), может в любом месте пространства в любой момент времени определить параметры своего движения – три координаты и три составляющие вектора скорости.

Федеральные органы власти, ответственности за использование, поддержание и развитие ГЛОНАСС – Министерство обороны (МО) и Российское космическое агентство (Российское авиационно-космическое агентство).

Документ, устанавливающий взаимоотношения потребителей с системой – Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС.

Число потребителей не ограничивается, т.к. НАП не передает радиосигналы на НКА, а только принимает их от НКА (пассивная навигация).

СРНС ГЛОНАСС состоит из:

- космического сегмента с орбитальной группировкой (ОГ);
- наземного комплекса управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА;
- сегмента НАП.

Орбитальная группировка системы ГЛОНАСС содержит 24 штатных НКА. В каждой орбите – 8 НКА. Время одного витка по орбите = 11ч 15 мин 44с.

Высота орбиты = 19100 км.

Цифровая информация (ЦИ) навигационного сообщения формируется на борту НКА на основе данных, передаваемых от НКУ системы на борт НКА с помощью радиотехнических средств.

Координаты потребителя в системе определяются посредством их расчета по псевдодальностям до НКА.

$$D_i = cT_i,$$

где

c – известная скорость распространения радиоволн,

T_i – временные задержки сигнала по трассе « i -й НКА-потребитель».

Псевдодальности по каждому НКА определяются по следующей формуле:

$$D_{iu} = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT' + \delta D_i,$$

где

X, Y, Z – прямоугольные координаты ВС с НАП в геоцентрической системе координат,

X, Y, Z_i – такие же координаты i -го НКА из навигационного сообщения,

T' -расхождение шкал времени НКА и потребителя.

Для решения задачи определения места и коррекции временной шкалы образуется система уравнений, неизвестными которой являются три координаты X, Y, Z и ошибка шкалы времени потребителя T' , проявляющаяся при априорном определении момента излучения сигнала НКА:

$$D_{iu} = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT', i = 1, \dots, N$$

3.3.5. Наземный комплекс управления

НКУ выполняет следующие функции:

- 1) проведение траекторных измерений для определения, прогнозирования и непрерывного уточнения параметров орбит всех спутников;
 - 2) временные измерения для определения расхождения бортовых шкал времени всех НКА с системной шкалой времени системы, синхронизация бортовой шкалы времени (БШВ) каждого НКА с временной шкалой ЦС и службы единого времени (СЕВ);
 - 3) формирование массива служебной информации (навигационных сообщений), содержащего спрогнозированные параметры орбит, альманах и поправки к БШВ каждого НКА и другие данные, необходимые для формирования навигационных кадров;
 - 4) передача(закладка) массива служебной информации в память бортовой ЭВМ каждого НКА и контроль за его прохождением;
 - 5) контроль за работой бортовых систем НКА и диагностика их состояния;
 - 6) контроль информации в навигационных сообщениях НКА, прием сигнала вызова НКУ;
 - 7) управление полётом спутников и работой их бортовых систем путем выдачи команд управления и передачи на борт прохождения этих данных;
 - 8) контроль характеристик навигационного поля;
- ЭО(эфемеридное обеспечение) НКА означает:

- 1) определение и прогноз параметров движения НКА;
- 2) «закладку» на борт НКА ЭИ(эфемеридной информации) для кадров ЦИ в навигационных радиосигналах.

Частотно-временное обеспечение (ЧВО) НКА означает:

- 1) определение и прогноз БШВ относительно ШВ системы;
- 2) «закладку» на борт НКА частотно-временных поправок(ЧВП) к БШВ, помещаемых в кадры ЦИ в навигационных радиосигналах.

Баллистический центр (БЦ) системы осуществляет определения и прогноз параметров движения НКА на основе результатов траекторных измерений дальности и радиальной скорости НКА, поступающих от сети наземных радиотехнических «запросных» командно-измерительных станций (КИС).

Основными погрешностями при определении псевдодальностей являются :

- 1) погрешности эфемеридной информации ;
- 2) погрешности частотно-временных поправок ;
- 3) ошибки за счёт шумов приёмника и внешних помех;
- 4) ошибки за счёт многолучёвости и особенностей распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере.

$$\delta_{ПД} = \sqrt{\delta_{\mathcal{E}}^2 + \delta_c^2 + \delta_{mp}^2 + \delta_{ion}^2 + \delta_{mn}^2 + \delta_{ш}^2},$$

где $\delta_{\mathcal{E}}^2$ - ошибки за счёт погрешностей ЭИ, δ_c^2 – ошибки за счёт синхронизации, δ_{mp}^2 - ошибки за счёт знания скорости распространения радиоволн в тропосфере, δ_{ion}^2 - ошибки за счёт знания распространения радиоволн в тропосфере, δ_{mn}^2 - ошибки за счёт многолучёвости, $\delta_{ш}^2$ - ошибки за счёт шумов приёмника и помех.

Контроль целостности радионавигационного поля (выявление отказов) осуществляется посредством:

- 1) непрерывного автономного самоконтроля работы основных бортовых

подсистем НКА;

2) внешнего контроля сигналов НКА с помощью аппаратуры контроля навигационного поля (АКНП), входящей в состав НКУ.

3.3.6. Совместное использование систем ГЛОНАСС и GPS

Одним из важнейших направлений совершенствования и развития спутниковой радионавигации является совместное использование сигналов ГЛОНАСС и GPS. Основные цели этого процесса- повышение точности и надёжности (доступности, непрерывности обслуживания и целостности) навигационных определений.

Наиболее важными предпосылками, обеспечивающими совместное использование являются:

- 1) общность принципов баллистического построения обеих систем (высота орбиты ≈ 20000 км, наклонение орбит $\approx 60^\circ$, период обращения КА ≈ 12 ч и др.);
- 2) общность используемого частотного диапазона (≈ 1600 МГц L1 и ≈ 1200 МГц L2);
- 3) общность принципов синхронизации и измерения навигационных параметров;
- 4) близость используемых систем координат;
- 5) практическая одновременность создания и совершенствования СРНС ГЛОНАСС и GPS;
- 6) готовность Правительств США и России предоставить системы для использования различными потребителями мирового сообщества.

Совместное использование двух систем предоставляет много выгод их пользователям, так как позволяет проводить почти круглосуточные навигационные определения во всех районах Земли за счёт большого числа ИСЗ в совмещённой системе.

В таблице 1 приведены данные по повышению точности и высоты определения ВС с помощью СРНС ГЛОНАСС, GPS и в комплексированной системе.

Таблица 1

Точности определения координат и высоты с помощью СРНС ГЛОНАСС и GPS

Режим	Координаты;drms;м	Высота;СКО;м
Все КА ГЛОНАСС, н*	9,0	13,5
16 КА ГЛОНАСС+GPS (СД);н	8,5	12,6
Все КА ГЛОНАСС+GPS (СД);н	8,4	12,5
Все КА ГЛОНАСС;д*	1,8	2,6
16 КА ГЛОНАСС +GPS;д	1,36	1,9
Все КА ГЛОНАСС+GPS (СД);д	1,24	1,82

Необходимо заметить, что для потребителей, первоначально ориентированных на GPS, использование сигналов ГЛОНАСС даёт практически троекратное повышение точности.

В следующих таблицах приведены полученные оценки доступности и максимальной продолжительности нерабочего состояния при использовании только КА GPS и GPS+ГЛОНАСС. На рис 3.7. приведено число видимых спутников для СРНС ГЛОНАСС, СРНС GPS и СРНС, полученной комплексным использованием спутников этих систем.

Таблица 2

Доступность СРНС на различных этапах полёта ВС, %

Группировка	Полёт по маршруту	Аэродромная зона	Неточный заход на посадку
GPS	98,58	96,53	67,26

GPS+ГЛОНАСС	100	99,99	98,87
GPS+ГЛОНАСС	100	100	100

Как следует из таблицы, использование GPS совместно с ГЛОНАСС приводит к существенному повышению доступности особенно для неточного захода на посадку (с 67% до 100 %).

Таблица 3

Максимальная продолжительность нерабочего состояния, мин.

Группировка	Полёт по маршруту	Аэродромная зона	Неточный заход на посадку
GPS	35	70	295
GPS+ГЛОНАСС (декабрь 1994г.)	0	15	30
GPS+ГЛОНАСС	0	0	0

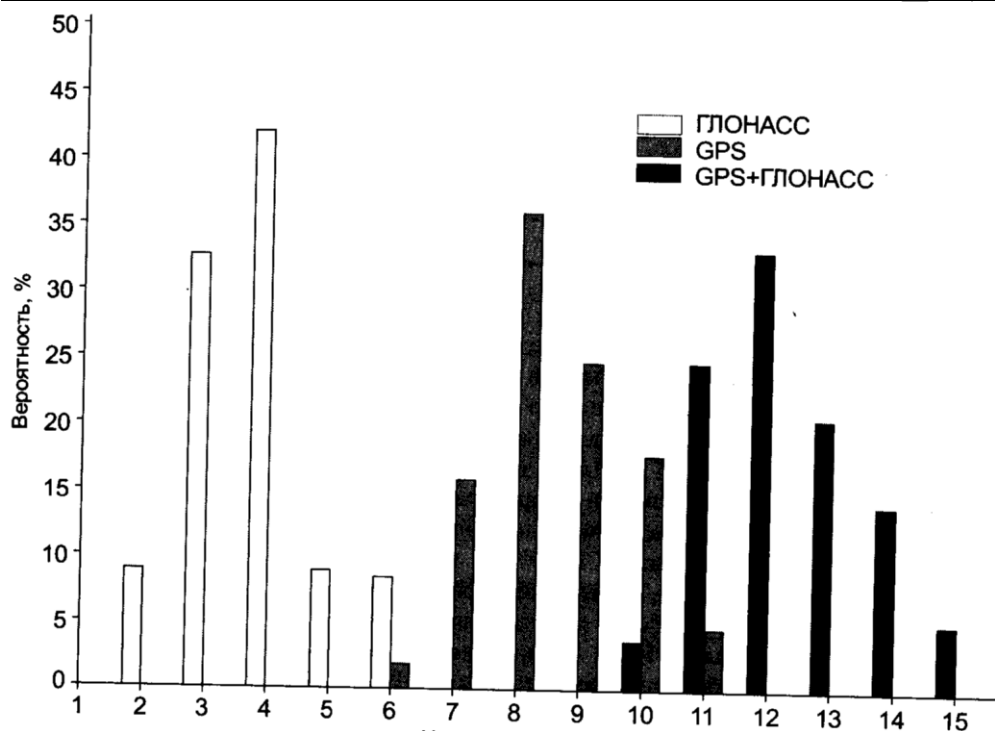


Рис. 3.7. Число видимых спутников

