

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВОК В РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ВОЛНАМИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛИН

Михайлов В.С.

Киевская государственная академия водного транспорта

Abstract

Michaelov V. The analysis of opportunities for transfer of differential amendments to radionavigating systems with waves of various ranges of lengths. Results of researches of an opportunity of transfer of amendments to a range of average, short and ultrashort waves are described.

Проблема создания системы радионавигационного обеспечения безопасности плавания на внутренних судоходных путях тесно связана с задачей передачи корректирующей информации, необходимой для точного определения местоположения объекта с помощью искусственных спутников Земли. Эта информация - дифференциальные поправки – может быть передана по различным каналам радиосвязи.

В данной статье проводятся исследования возможности передачи диффпоправок в диапазоне средних (СВ), коротких (КВ) и ультракоротких (УКВ) волн.

К диапазону СВ относятся радиоволны с длиной волны $\lambda = 10^2 \dots 10^3$ м ($f = 300$ кГц... 3 МГц). В диапазоне СВ распространение радиоволн возможно двумя способами.

Первый способ - это распространение поверхностной (земной) волны. В этом случае распространение существенно связано с поглощением радиоволн полупроводящей поверхностью Земли. Дальность связи не превышает 2000 км. (Обычно - это 1000 км.)

Второй способ – это распространение радиоволн посредством ионосферных волн с одно- или двукратным отражением от слоя Е ионосферы. При этом обеспечивается связь на значительные дальности (несколько тысяч километров). Однако такой вид распространения возможен только в ночное время. В дневные часы из-за сильного поглощения в слое Д распространение радиоволн СВ диапазона практически возможно только с помощью земной волны. Кроме времени суток на распространение СВ влияет также время года. Поглощение СВ увеличивается в летние месяцы и уменьшается в зимние.

Основными видами помех радиосвязи в этом диапазоне СВ являются атмосферные шумы и помехи (аддитивные помехи), и замирения (дальние и ближние) уровня принимаемых сигналов (мультипликативные помехи). Период замираний составляет 1 мин и более. Проявляются замирения, главным образом, в ночное время. Статистические закономерности поведения таких замираний в ряде случаев удовлетворительно описываются логарифмически нормальным законом распределения плотности вероятности амплитудного коэффициента передачи сигналов в канале радиосвязи [1].

Корреляция замираний двух разнесенных по частоте гармонических сигналов, определяет степень селективности замираний по частоте. Корреляция практически отсутствует при частотном разносе сигналов в 400 ... 500 Гц в основной части диапазона и при частотном разносе более 1кГц в верхней части диапазона 1... 3 МГц. [1]

Таким образом, для передачи дифференциальных поправок в диапазоне СВ можно использовать поверхностные (земные) волны с дальностью связи по условиям распространения до 1000 км. Поскольку время передачи разовой дифференциальной

поправки не превышает 20... 30 с, то временные замирения сигналов можно практически не учитывать. Что касается селективных замираний, разрушающих частотную структуру сигналов, то ширина спектра радиосигналов диффпоправок лежит в пределах 400... 600 Гц.

В диапазоне коротких волн ($\lambda = 10... 100$ м, $f = 3... 30$ МГц) поверхностные волны распространяются на дальности не более 200 км из-за сильного поглощения земной поверхностью и плохих условий дифракции. Ионосферные же волны распространяются на тысячи километров за счет одноразового или многократного отражения от слоя F (ночью) или слоев F₁ и F₂ (днем). В слоях E и D волны этого диапазона претерпевают поглощение. Характерным для распространения коротких волн являются два обстоятельства. Во-первых, наличие зоны молчания, обычно на дальностях от 200 км до 500 км, когда поверхностной волны уже нет, а ионосферной, с однократным отражением, еще нет. Во-вторых, наличие максимально применимой частоты (МПЧ), значение которой меняется в течение суток, ограничивая выбор рабочих частот. Поэтому обычно днем работают на частотах $f = 12... 30$ МГц ($\lambda = 10... 25$ м), ночью - на частотах $f = 3... 8,6$ МГц ($\lambda = 35... 100$ м). Участок 8,5... 12,5 МГц может использоваться в любое время суток [2].

Диапазон коротких волн характеризуется большой загрузкой радиочастот и значительным уровнем всевозможных помех. Из класса аддитивных помех здесь присутствуют шумы, в том числе атмосферные и космические, взаимные помехи одновременно работающих радиосредств или, как их принято называть, сосредоточенные (по спектру) помехи, а также импульсные помехи с длительностью $10^{-5}... 10^{-8}$ с от грозových разрядов и различного рода промышленных устройств (помехи от линий электропередач, устройств зажигания двигателей внутреннего сгорания, газовых разрядов и т.д.).

Класс мультипликативных помех также представлен весьма обширно. Прежде всего, замирениями сигналов и взаимных помех (быстрыми и медленными замирениями, гладкими и селективными) [1]. При этом быстрые замирения имеют период, соизмеримый с T-длительностью элементарных посылок сигналов. Селективность характера замираний проявляется в случае, если полосы частот сигналов превышают несколько сотен Гц. Обычно считают, что в этом диапазоне замирения двух гармонических сигналов некоррелированы (чисто селективные), если разнос гармоник по частоте составляет несколько сотен Гц: 1 кГц в нижней части диапазона и 1... 2 кГц в его верхней части. Что касается статистических характеристик μ и μ_{Π} , амплитудных коэффициентов передачи полезного сигнала и взаимной помехи соответственно, то их одномерные плотности вероятностей $W_{(\mu)}$ и $W_{\mu_{\Pi}}$ удовлетворяют обычно обобщенному рэлеевскому (райсовскому) закону распределения [1]:

$$W_{(\mu)} = \frac{\mu}{\bar{\mu}_{\Phi}^2} e^{-\frac{\mu^2 + \mu_P^2}{2\bar{\mu}_{\Phi}^2}} I_0(\mu \mu_P / \bar{\mu}_{\Phi}^2), \quad \mu_{\Pi} \geq 0 \quad (1)$$

$$W_{(\mu_{\Pi})} = \mu_{\Pi} / \bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2 e^{-(\mu_{\Pi}^2 + \mu_{P\Pi}^2) / 2\bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2} \cdot I_0(\mu_{\Pi} \mu_{P\Pi} / \bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2), \quad \mu_{\Pi} \geq 0$$

где μ_{Φ} , $\mu_{\Phi\Pi}$ и μ_P , $\mu_{P\Pi}$ – соответственно, флюктуирующие и регулярные составляющие коэффициентов передачи;

$\bar{\mu}_{\Phi}^2$, $\bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2$ – среднестатистические значения μ_{Φ} , $\mu_{\Phi\Pi}$;

$I_0(\bullet)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка [3].

При отсутствии регулярной составляющей эти плотности вероятности удовлетворяют рэлеевскому закону:

$$W_{(\mu)} = \frac{\mu}{\bar{\mu}_{\Phi}^2} e^{-\frac{\mu^2}{2\bar{\mu}_{\Phi}^2}}, \quad \mu \geq 0$$

$$W_{(\mu_{\Pi})} = \mu_{\Pi} / \bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2 e^{-\mu_{\Pi}^2 / 2\bar{\mu}_{\Phi\Pi}^2}, \quad \mu \geq 0 \quad (2)$$

В настоящее время принято считать, что в диапазоне КВ рэлеевские и обобщенные рэлеевские замирания встречаются примерно одинаково часто, хотя возможны и заметные колебания в пользу какого-либо из этих законов, причем это утверждение справедливо для замираний с периодом до 5 мин [1]. В течение больших интервалов времени распределение замираний ближе к логарифмически нормальному со среднеквадратичным отклонением $6 \pm 1,25$ дБ [2].

Из других типов мультипликативных помех в диапазоне коротких волн встречаются так называемое “эхэ” и помехи, вызванные дисперсными свойствами среды распространения.

Таким образом для передачи дифференциальных поправок в диапазоне коротких волн можно использовать поверхностные (земные) волны с дальностью связи по условиям распространения до 200 км. Однако в отличие от диапазона средних волн в этом диапазоне необходимо считаться с временными замираниями уровней сигналов, удовлетворяющих обобщенному рэлеевскому или просто рэлеевскому законам распределения вероятностей уровней. С точки зрения преодоления селективных замираний лучше использовать рабочие частоты в верхней части диапазона 25... 30 МГц, где ширина спектра радиосигналов диффпоправок может составлять величину до 2 кГц. Высокой достоверности приема сигналов диффпоправок во всем диапазоне можно достичь лишь при применении специальных мер борьбы с сосредоточенными и импульсными помехами.

В диапазоне ультракоротких метровых волн ($\lambda = 1 \dots 10$ м, $f = 30 \dots 300$ МГц) и дециметровых ($\lambda = 0,1 \dots 1$ м, $f = 300 \dots 3000$ МГц) волн для обеспечения связи на внутренних водных путях используется диапазон частот 300... 336 МГц, т.е. верхняя граница диапазона метровых и сравнительно небольшой интервал вблизи нижней границы дециметровых волн.

Здесь для распространения УКВ характерны следующие основные закономерности. [4]:

Во-первых, радиосвязь обеспечивается только поверхностной волной, распространяющейся в тропосфере в пределах прямой видимости. При наличии эффекта нормальной тропосферной рефракции предельная дальность УКВ связи несколько возрастает и определяется соотношением

$$D_H \approx 3,57 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{R_0 / R_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4,12 \cdot 10^3 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (3)$$

где $R_0 = 6,37 \cdot 10^6$ м – радиус Земли;

$R_0 = 8500$ км – эквивалентный радиус Земли при нормальной рефракции;

h_1 и h_2 – высоты подъема передающей и принимающей антенн соответственно в м. Во-вторых, условия распространения существенно зависят от специфики и рельефа трассы. Суммарная напряженность поля электромагнитных волн в точке приема здесь определяется интерференционными соотношениями, а при малой высоте подъема вибраторной антенны по формуле М.В.Шулейкина и Б.Ван-дер-Поля [5]. При этом изменение профиля рельефа между корреспондентами существенно влияет на условия приема. В последнее время для учета специфики рельефа между корреспондентами широко используют методы математической статистики [4]. При этом наиболее близкими к фактическим данным оказываются законы равномерной плотности распределения высот рельефа H на местности, показательный и нормальный, наиболее типичные для таких регионов Европы, как Украина, Прикарпатье, Дунайская низменность, некоторые судоходные каналы России и др.

Закон равномерной плотности описывается следующей зависимостью:

$$W(H) = \frac{1}{H_{\max} - H_{\min}},$$

где H_{\max} и H_{\min} - максимальная и минимальная границы интервала распределения высот на местности (характерно для горных регионов). Показательный закон

$$W(H) = \alpha_n \cdot e^{\alpha_n H}$$

где α_n - параметр распределения, характерен, например, для районов Прибалтики, Северо-Западной части России, в том числе района волго-балтийского водного пути, равнинной части бассейна Днепра, Причерноморья, Дунайской низменности и др. Нормальный закон

$$W(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{(H - \bar{H})^2}{2\sigma_n^2}\right]$$

где \bar{H} – среднее значение высот на местности, σ_n^2 – дисперсия распределения высот, типичен для районов Северного Урала, Центрально-Европейской области России, Прикарпатья и т.д.

В-третьих, радиосвязь УКВ существенно зависит от характера размещения радиостанций корреспондентов на местности и от взаимного перемещения их друг относительно друга [5]. Исходя из того, что в любой момент абонентские станции поддерживают связь между собой, находясь на различных удалениях друг от друга, не превышающих предельного расстояния D или D_n , размещение станций в теоретических и инженерных расчетах описывают с помощью функции распределения или плотности вероятности расстояний, на которых ведется связь. Функция распределения напряжений полезного сигнала и взаимных помех в каждой точке приема зависит от функции распределений расстояний между абонентскими станциями на местности. Точных данных о статистике взаимных удалений станций в системах различного назначения нет, поэтому в необходимых случаях задаются характеристиками размещения подвижных абонентов на местности. Допускают, что все расстояния между абонентами в интервале от R_{\min} до R_{\max} равновероятны. Тогда плотность вероятности взаимных удалений между радиостанциями определяется по зависимости

$$W(R) = \frac{1}{R_{\max} - R_{\min}}.$$

Если абоненты равномерно распределены на местности, то справедливо следующее выражение:

$$W(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - R_{\min}^2}.$$

В других случаях допускают, что некоторое расстояние μ_{01} наиболее вероятно в заданном интервале расстояний. Тогда используют либо рэлеевский закон распределения взаимных удалений абонентов

$$W(R) = \frac{R}{\sigma_R^2} e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}},$$

где $R \geq 0$, а σ_R^2 - дисперсия расстояний, либо закон распределения Максвелла, у которого плотность распределения выглядит симметричной относительно среднего значения расстояния

$$W(R) = \sqrt{2/\pi} \frac{R^2}{\sigma_R^2} e^{-R^2/2\sigma_R^2},$$

где $R \geq 0$

В-четвертых, радиосвязь в рассматриваемом диапазоне существенно зависит также от статистических характеристик μ амплитудного коэффициента передачи радиоканала между корреспондентами и от типа аддитивных помех в зоне радиусом D или D_n . Что касается одномерной плотности вероятности μ , то в общем случае она определяется следующим четырех параметрическим распределением [4]:

$$W(\mu) = \frac{\mu}{\sigma_x \sigma_y} e^{-\frac{m_y^2 + \mu^2}{2\sigma_y^2} - \frac{m_x^2}{2\sigma_x^2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{H_{2k}(\alpha)}{(2k)!! 2^k} \mu^k \left(\frac{\sigma_y}{m_y}\right)^k \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2}\right)^k I_{2k}\left(\frac{\mu m_y}{\sigma_y^2}\right) \quad (4)$$

где $\sigma_x^2 \leq \sigma_y^2$ - дисперсия ортогональных компонент коэффициента передачи; m_x и m_y - средние значения ортогональных компонент μ ,

$$\alpha = \frac{m_x}{\sqrt{2} \sigma_y \sqrt{\frac{1}{\sigma_x^2} \cdot \frac{1}{\sigma_y^2}}}, \quad \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2} < 1$$

$H_{2k}(\bullet)$ и $I_{2k}(\bullet)$ - модифицированные функции Бесселя второго и первого рода.

При определенных условиях распространения радиоволн из (4) следует ряд важных частных случаев.

При таком фазировании регулярной составляющей, когда имеет место

$$m_y = 0, |m_x| = \mu_p$$

из (4) следует трехпараметрическое распределение Бекмана:

$$W(\mu) = \frac{\mu}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{\mu^2 + \mu_p^2}{\sigma_x^2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k-1)!! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^2}{k! 2^k \sigma_y^k \mu_p^k} I_k\left(\frac{\mu \mu_p}{\sigma_x^2}\right), \quad (5)$$

где $\mu \geq 0$.

При симметрии канала передачи по дисперсиям квадратурных составляющих, т.е.

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$$

из (5) получается обобщенное рэлеевское (райсовское) распределение коэффициентов передачи:

$$W(\mu) = \frac{\mu}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\mu^2 + \mu_p^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\mu \mu_p}{\sigma^2}\right),$$

где $\mu \geq 0$.

При отсутствии регулярной составляющей сигнала $\mu_p = 0$ отсюда следует рэлеевское распределение:

$$W(\mu) = \frac{\mu}{\sigma^2} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}}.$$

Экспериментальные измерения на УКВ трассах показывают, что при дальнем тропосферном распространении радиоволн встречаются как райсовские, так и рэлеевские распределения с заметным удельным весом последних [1]. При этом замирения сигналов

носят как гладкий, так и селективный характер. Последний имеет место при частотных разностях компонент более 2 МГц [1,4].

Далее, из аддитивных помех для области частот, примыкающей к границе между метровым и дециметровым диапазонами УКВ характерны флуктуационные шумы, взаимные помехи одновременно работающих радиосредств и импульсные помехи промышленного происхождения. Последние особенно заметны в районах крупных транспортных узлов типа морского и речного портов Санкт-Петербурга, нижегородского порта, а также московского промышленного района и т.п. Вместе с тем уровень аддитивных помех в этой области частот безусловно ниже, чем в диапазоне коротких волн.

Для передачи дифференциальных поправок в диапазонах метровых и дециметровых волн УКВ можно использовать только поверхностные тропосферные волны с предельной дальностью связи, определяемой значениями D и D_n из (2) и (3).

Для обеспечения высокой достоверности приема сигналов здесь, помимо статистических характеристик коэффициентов передачи каналов и аддитивных помех, необходимо учитывать сильное влияние загрождающего рельефа и законов распределения корреспондентов на местности. Селективный характер замираний в области 300... 336 МГц начинает проявляться при частотных разностях гармонических составляющих сигналов, превышающих 2 МГц, что позволяет достаточно эффективно использовать сложные сигналы.

Заключение

В рассматриваемой статье проведен анализ возможностей надежной передачи диффпоправок по каналам связи “ККС-судно” на дальности до 500...550 км в различных диапазонах радиоволн: СВ, КВ, УКВ. Показано, что наиболее перспективными для этих целей являются поддиапазон 250... 450 кГц СВ диапазона с использованием поверхностных (земных) волн и поддиапазоны морских 156... 162 МГц и речных 300... 336 МГц наборов частот УКВ диапазона с использованием метода ретрансляции в сотовых сетях.

Литература

1. Сикарев А.А., Фалько А.И. Оптимальный приём дискретных сообщений. - М., Связь, 1978, 328 с.
2. Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. М., Радио и связь, 1985, 328 с.
3. Таблицы вероятностных функций. Пер. с англ. Л.С.Барк. - М., ВЦ АН СССР, 1970, 344с.
4. Доровских А.В., Сикарев А.А. Сети связи с подвижными объектами. - Киев, Техника, 1989, 158 с.
5. Ракитин В.Д., Сикарев А.А. Предложения по применению СНС “Глонасс Навстар” в дифференциальном режиме на ВВП. Раздел 5 / Отчёта НИР по теме 93 - 003/36, СПГУВК, 1994.

Поступила в редакційну колегію 20.06.2002