

Развитие алгоритмов синхронизации систем ВЧ связи и панорамного зондирования ионосферы

В.А.Иванов, Д.В.Иванов, Н.В.Рябова, А.А.Чернов

Марийский государственный технический университет, 424000, РФ, респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3; chernovas@marstu.net

С общих позиций сформулирована задача синхронизации систем зондирования ионосферы и ионосферных каналов ВЧ связи. Представлен обоснованный алгоритм ее решения. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований диапазонов задержек зондирующих сигналов на ионосферных линиях связи различной протяженности.

With the common positions formulated the problem of synchronization of the ionosphere sounding systems and ionospheric HF communication channel. A reasonable algorithm for its solution are presented. The results of experimental and theoretical research of ranges of delays of the sounding signal on ionospheric communication lines of different ranges are presented.

Введение.

Применение цифровых технологий в коротковолновой связи позволяет говорить о дальнейшем повышении ее надежности и эффективности, но актуальной остается проблема детального учета изменчивости среды распространения, шума и помех в коротковолновом канале, из-за которых связной сигнал испытывает серьезные искажения, имеющие случайный характер. Преодолеть негативное влияние среды способна система связи, адаптирующаяся к условиям распространения, и устанавливающая по результатам предсеансового зондирования линии связи оптимальные параметры для передачи [1-3]. Однако при этом возникает подпроблема синхронизации терминалов радиотехнических систем, разнесенных в пространстве на тысячи километров. Для ее решения необходимо получить обоснование алгоритма синхронизации, учитывающего изменчивость среды и обеспечивающего возможность автоматической работы на заранее неизвестных трассах различной протяженности путем синхронизации к единому (всемирному или национальному) координированному времени, учета абсолютного времени распространения сигнала от передатчика к приемнику и доплеровского смещения частоты. Кроме того для создания оптимального алгоритма синхронизации важным является проведение натурных и вычислительных экспериментов.

Цель работы. Теоретическое обоснование и исследование нового алгоритма синхронизации пространственно разнесенных терминалов систем КВ связи и радиозондирования ионосферы.

Предположим, что радиотехническая система (РТС) коротковолновой связи излучает в канал распространения сигнал вида (1):

$$u_T(t) = U_0(t) \cdot \cos(2\pi\bar{f}t + \theta(t)) \quad (1)$$

Принимаемый сигнал в лучевом приближении можно представить в виде (2):

$$u_R(t) = \sum U_{0R}(t - \tau_g) \cdot \cos[2\pi(\bar{f} + F_d)(t - \tau_p) + \theta_R(t)] + u_n(t), \quad (2)$$

где U_{0R} - амплитуда выбранной моды принимаемого сигнала, τ_g - задержка ее огибающей (групповая), τ_p - ее фазовая задержка, F_d - ее доплеровское смещение частоты из-за распространения в канале, θ_R - ее фаза, $u_n(t)$ - шумовой сигнал. В случае, если полоса сигнала меньше полосы когерентного распространения имеем $\tau_g = \tau_p$. Сравнивая (1) и (2) видим, что принимаемый сигнал отличается от

излучаемого амплитудой, частотой, фазой, началом отсчета времени на величину задержки и шумом. Поэтому в начале необходимо решить задачу обнаружения сигнала на фоне шумов, затем оценить разности изменения амплитуды сигнала, его фазы и частоты, а также изменения начала отсчета времени. Для подобной в приемнике должны содержаться образцы исходных времени и частоты, обеспечиваемые идентичными часами и эталоном частоты. Это достигается путем создания специальной подсистемы, называемой подсистемой синхронизации (ПСС) [1,4,5].

Рассмотрим функцию, характеризующую производительность модема ВЧ связи. Функция называется характеристической поверхностью производительности (ХПП) и показывает, при каких параметрах канала и с какой скоростью может быть организована передача данных с заданной вероятностью ошибки на бит (BER). ХПП принято изображать над плоскостью $\{\sigma_\tau, \sigma_F\}$, где σ_τ - рассеяние по задержке, σ_F - рассеяние по доплеровскому сдвигу частоты в канале связи. Кроме того ХПП системы ВЧ связи можно аппроксимировать прямоугольным параллелепипедом, заданным плоскостями: $\sigma_\tau = \sigma_{s\tau}, \sigma_F = \sigma_{sF}, S/N = (S/N)_s$ - отношение сигнал-шум.

Рассматривая задачу вхождения в синхронизм РТС связи далее, предположим, что шкалы времени и тактовые частоты приемного и передающего терминалов уже синхронизированы. В таком случае рассинхронизация работы РТС может быть вызвана задержкой сигнала и доплеровским смещением частоты в канале распространения.

Воспользуемся функцией рассеяния канала, измеряемой при зондировании узкополосных каналов. Ее можно аппроксимировать гауссовой поверхностью в виде импульса, в вертикальных сечениях которой, проходящих через вершину, получаем функции Гаусса, а в горизонтальных – эллипсы с осями, направленными по координатным осям: (τ, F_d) . Аналитический вид такой ФРК (3):

$$S(\tau, F_d) = \left(\frac{S}{N}\right)_c \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_m)^2}{2\sigma_{c\tau}^2} - \frac{(F_d - F_{dm})^2}{2\sigma_{cF}^2}\right], \quad (3)$$

$\sigma_{c\tau}$ - рассеяние ФРК по задержке, σ_{cF} - рассеяние ФРК по доплеровскому сдвигу, $\left(\frac{S}{N}\right)_c$ - максимальное значение ФРК.

ФРК имеет значимую величину внутри эллипса (4) с полуосями $\sigma_{c\tau}$ и σ_{cF} :

$$\frac{(\tau - \tau_m)^2}{2\sigma_{c\tau}^2} + \frac{(F_d - F_{dm})^2}{2\sigma_{cF}^2} \leq 1. \quad (4)$$

Поэтому для аргументов ФРК следуют неравенства (5):

$$|\tau - \tau_m| = |\Delta\tau| \leq \sigma_{c\tau}, \quad |F_d - F_{dm}| = |\Delta F_d| \leq \sigma_{cF}, \quad (5)$$

$|\Delta\tau|$ и $|\Delta F_d|$ - называются рассеянием по задержке (во временной области) и доплеровскому смещению частоты (в частотной области). Введем для них следующие обозначения: $|\Delta\tau| = \sigma_\tau, |\Delta F_d| = \sigma_F$. Модем будет работать устойчиво только при выполнении условий (6): $\sigma_{s\tau} > \sigma_{c\tau}, \sigma_{sF} > \sigma_{cF}, (S/N)_s < (S/N)_c$.

Для ХПП модема можно ввести следующие ключевые параметры, порожденные состоянием канала распространения: $\tau_m, F_{dm}, \left(\frac{S}{N}\right)_c, \sigma_{c\tau}, \sigma_{cF}$.

Система зондирования может определить ФРК в области априорной неопределенности значений ее параметров. На плоскости (τ, F_d) она задана прямоугольником (рис. 1), ограниченным прямыми: $\tau = 0, \tau = \tau_a, F_d = +F_{ad}, F_d = -F_{ad}$.

Если часы на передающем и приемном терминале зонда работают синхронно с УТ, то за начало отсчета примем значения аргументов для передающего терминала. Тогда ФРК на приемном терминале будет иметь вид, заданный формулой (3), изображенный на этом же рисунке. Проекция максимума на плоскость аргументов находится в точке (τ_m, F_{dm}) .

Введем еще одну систему координат, где задержка и доплеровское смещение частоты обозначены штрихами, с началом в данной точке. В новой системе координат уравнение для ФРК:

$$S(\tau', F'_d) = \left(\frac{S}{N}\right)_c \exp\left[-\frac{\tau'^2}{2\sigma_{c\tau}^2} - \frac{F'_d{}^2}{2\sigma_{cF}^2}\right]. \quad (6)$$

Перепишем условия (5):

$$|\tau'| \leq \sigma_{c\tau} \text{ и } |F'_d| \leq \sigma_{cF}, \quad |\tau'| = \sigma_{\tau}, \quad |F'_d| = \sigma_F \quad (7)$$

В области положительных значений новых аргументов ФРК позволяет получить отсчеты параметров: $\sigma_{c\tau}$ и σ_{cF} . На этом же рисунке в системе штрихованных координат изображена проекция ХПП на плоскость аргументов, это позволяет точку с параметрами ФРК соотнести с прямоугольным параллелепипедом, которым определяется ХПП.

Отметим, что операция смещения начала координат и будет являться синхронизацией системы зондирования во временной и частотной областях. Поэтому для ее реализации необходимо выполнить измерение значений (τ_m, F_{dm}) в соответствии с рассмотренным алгоритмом.

Таким образом, с математической точки зрения процедура синхронизации системы ВЧ связи заключается в перемещении на приемном терминале нового отсчета времени и частоты на плоскости аргументов в точку проекции максимума ФРК.

Теперь рассмотрим задачу вхождения в синхронизм для панорамного ионозонда с непрерывным ЛЧМ сигналом от 2 до 30 МГц. В этом случае приходится решать задачу в частотной области. Действительно, разностная частота k -ой моды принимаемого сигнала имеет вид:

$$F_k = \dot{f}\tau_k + F_{dk}, \quad (8)$$

где \dot{f} - скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала.

Обычно параметры зондирующего сигнала выбирают такими, чтобы выполнялось условие: $\dot{f}\tau_k \gg F_{dk}$. В таком случае выражение (8) переписывается в виде (9):

$$F_k \cong \dot{f}\tau_k. \quad (9)$$

Это означает, что в панорамном ЛЧМ ионозонде рассинхронизацией по доплеровской частоте требуется пренебречь и задача вхождения в синхронизм сводится только к задаче синхронизации во временной области. Это обстоятельство накладывает ограничения на параметры зондирующего сигнала.

На рис. 2 представлена схема рассинхронизации в этом случае. На оси частот точками показано положение разностных частот принимаемых мод распространения сигналов, а жирной линией – окно обзора зонда в области разностных частот.

Процедура вхождения в синхронизм сводится к совмещению начала отсчета обеих осей, для этого необходима оценка смещения начала отсчета оси разностной частоты приемного терминала. Для ее решения использовался метод вычислительного эксперимента.

По данным международной справочной моделью ионосферы IRI на базе квазипараболической сегментации (QPS) для модели профиля электронной

концентрации с учетом кривизны Земной поверхности и преобладающих на трассах различной протяженности мод были синтезированы ионограммы наклонного зондирования для различных состояний ионосферы, зависящих от солнечной активности, сезонов и времени суток. Поскольку преобладающие моды распространения зависят от протяженности трассы, то для расчетов были использованы данные о них из [6-8].

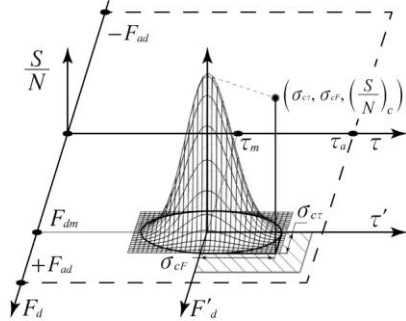


Рис.1. Алгоритм синхронизации РТС ВЧ связи

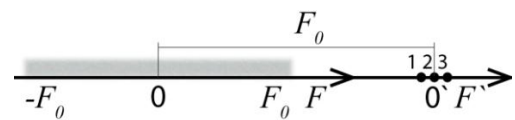


Рис. 2. Алгоритм синхронизации ЛЧМ ионозонда

Достоверность расчетов проверена в натурных экспериментах, проведенных с помощью ЛЧМ ионозонда МарГТУ на трассах Кипр – Йошкар-Ола и Иркутск – Йошкар-Ола. Установлено, что для спокойной ионосферы натурные и синтезированные ионограммы близки по своему виду, что означает достаточную адекватность расчетного алгоритма и выбранных моделей среды и распространения ВЧ на трассах. Поэтому на основе синтезированных ионограмм производилось построение гистограмм распределения задержек. Отсчитывались задержки принимаемых мод распространения с шагом по частоте, равном 100 кГц. При этом сигналу на выделенной задержке ставился в соответствие импульс единичной высоты. Пример такой гистограммы для трассы Кипр-Йошкар-Ола для дневного времени суток 02.02.2011 8:20 UTC приведен на рис. 3.

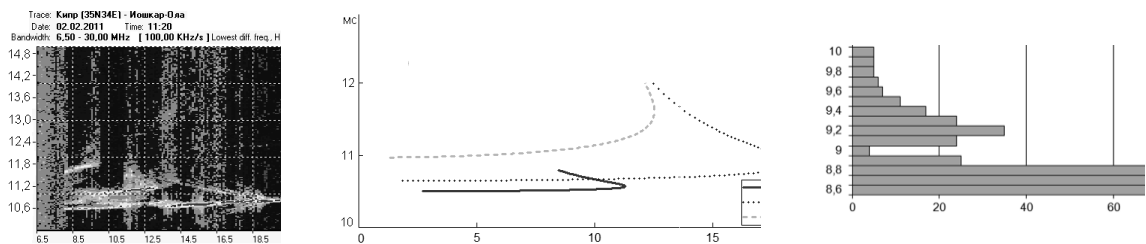


Рис.3. Гистограмма вероятности распределения задержки сигнала

Полученные диапазоны преобладающих задержек и абсолютного времени распространения для трасс различной протяженности при различных условиях распространения приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Преобладающие задержек сигналов на трассах различной протяженности

Трасса, км	Диапазон преобладающих задержек, мс			
	Зима		Лето	
	День	Ночь	День	Ночь
1000	3,3	3,9	3,3	4,0
3000	3,2	3,8	3,9	4,3
5000	4,3	4,9	4,5	4,9

Таблица 2. Результаты расчетов абсолютного времени распространения

Трасса, км	Абсолютное время распространения, мс			
	Зима		Лето	
	День	Ночь	День	Ночь
1000	3,3	3,39	3,31	3,38
3000	11,06	11,1	11,058	11,06
5000	17,9	18,2	17,9	17,2

Выводы

Предложен и теоретически обоснован алгоритм синхронизации систем КВ связи. Экспериментально показано, что на трассах протяженностью от 1000 км до 5000 км размер анализируемого временного окна равен 5 мс, а абсолютное время распространения может быть рассчитано и введено в качестве поправки на приемном терминале. Полученные результаты используются в разработке программной части устройства автоматической синхронизации системы наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 10-02-00620; 10-07-00466-а; 11-07-00420-а; ФЦП: ГК № 14.740.11.1436, 14.740.11.1147, № 14.740.11.1209, 14.740.11.1436; № АВЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011.

Литература

1. Фролов А.И. Синхронизация цифровых радиосистем передачи информации. М.:Сайнс-Пресс, 2008, 80с.
2. Петько П.В. Синхронизация передающих комплексов ЛЧМ ионозондов в автоматическом режиме/ П.В. Петько, Г.И. Литовкин, В.Е. Заруднев // Труды VII Сессии молодых ученых. БШФФ-2004., Иркутск, С. 155–158.
3. Пушкарев О., Беспроводная система синхронизации времени на основе сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS / О. Пушкарев, // Беспроводные технологии. – 2010. – №2.
4. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. М.: Радио и связь. 2003. 640 с.
5. В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами// Вестник МарГТУ: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2010.- №1, С 3 -37.
6. Иванов, В.А. Многочастотное наклонное зондирование ионосферы для загоризонтного позиционирования: монография / В.А. Иванов, Е.В. Катков. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – 218с.
7. Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: монография. Йошкар-Ола, 2006, 268с.
8. В.А. Иванов, Е.В. Катков, А.А. Чернов. Устройство и алгоритмы синхронизации радиотехнических систем связи и зондирования ионосферных высокочастотных радиоканалов // Вестник МарГТУ: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010.- №2, С 114 -126.