

УДК 621.391.26

В.Д. Карлов, Ю.А. Сирьк, А.В. Тугай

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭХО-СИГНАЛОВ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РАДИОВОЛН ПРИ ИХ МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ

В статье в рамках многолучевого механизма распространения сигналов декаметрового диапазона радиоволн проанализирована зависимость ширины спектра амплитудных флуктуаций сигнала отражённого от лоцируемой цели от высоты полёта цели и вида поляризации излучаемых радиосигналов. В качестве лоцируемой цели выбран стратегический бомбардировщик В-2. Расчёты проведены для среднеширотной ионосферы применительно к среднепересечённой местности. Основное внимание уделено двухлучевому механизму распространения радиосигналов.

Ключевые слова: локация групповых целей, декаметровый диапазон радиоволн, амплитудные флуктуации, многолучевое распространение.

Введение

Постановка проблемы: При локации целей в декаметровом диапазоне радиоволн одной из особенностей является многолучевое распространение [1]. Так в соответствии с [1] на среднеширотных трассах малой протяжённости ($D \leq 800$ км) наблюдается два луча. На трассах протяжённостью $1000 \leq D \leq 2500$ км наблюдалось до трёх [2] лучей. При этом данным [3] на трассах протяжённостью

до 3000 км число лучей в значительной степени определяется величиной отношения $f/f_{\text{мпч}}$, где f – несущая частота зондирующего сигнала, $f_{\text{мпч}}$ – максимально применимая частота. Установлено, что при $f/f_{\text{мпч}} \leq 0,3$ сигнал в пункте приёма практически не обнаруживается [3]. С увеличением f наблюдалась [3] тенденция к уменьшению числа лучей и увеличению вероятности прохождения одного луча. Как следует из [1, 3] при отношении $f/f_{\text{мпч}} = 0,5 \dots 0,9$ следует с вероятностью 0,8 ожидать появление од-

ного луча. В целом же чаще всего на рассматриваемых трассах следует ожидать появление двух лучей [1 – 3]. При этом относительная задержка сигналов распространяющихся по разным лучам имеет сезонную и суточную зависимость [1]. Сезонный ход относительных задержек следующий. Они минимальны в мае-июне (1,0...2,7 мс), затем возрастают и достигают своего максимального значения в октябре-ноябре (3,5 мс). Суточная зависимость относительной задержки сигналов была зафиксирована [1] следующая. В утренние и вечерние часы относительная задержка уменьшалась. Наиболее вероятные значения задержки лежали в интервале 1...2 мс. Максимальное значение (3,5 мс) было зафиксировано в интервале часов от 12 до 15 по местному времени. На трассах до 3000 км относительное групповое запаздывание лучей зависит от отношения $f/f_{\text{мпч}}$ [1, 3]. По данным [3] при отношении $f/f_{\text{мпч}}=0,4...0,5$ получаемые задержки сигналов лучей соответствуют максимальным. На трассах малой протяженности ($D \leq 800$ км) разница во времени распространения сигналов лучей достигает наибольшего значения при $f/f_{\text{мпч}}=0,85...0,9$. Анализ углов прихода лучей в вертикальной плоскости, проведенной в [1] показал, что угловая селекция траектории лучей из-за большой ширины диаграммы направленности приёмной антенны РЛС затруднительна. Таким образом на приёмную антенну РЛС декаметрового диапазона радиоволн приходят эхо-сигналы распространяющиеся по разным лучам, которые не разрешаются по угловым координатам, не всегда разрешаются по задержке и чаще (но не всегда) могут разрешаться по доплеровскому смещению частоты [1]. Наличие разрешённых лучей приводит к размножению эхо-сигналов от одиночной цели. Неразрешённые сигналы лучей интерферируют в раскрыве антенны. При этом возможны искажения радиолокационных сигналов приводящих к изменениям в спектре амплитудных флуктуаций сигнала отражённого от одиночной цели за счёт многолучевого распространения. В настоящее время в известной литературе данный аспект раскрыт недостаточно полно. Данная статья и предназначена для восполнения этого пробела.

Цель статьи. В рамках многолучевого механизма распространения декаметрового радиосигнала проанализировать зависимость ширины спектра амплитудных флуктуаций отражённого от цели сигнала от высоты полёта цели и вида поляризации излучаемых радиоимпульсов.

Основной материал

Рассчитаем спектр амплитудных флуктуаций для отражённых от цели сигналов декаметрового диапазона радиоволн при многолучевом распространении. Поле многолучевого сигнала представленным в виде суммы полей отдельных лучей

$$\dot{E} = \sum_{n=1}^N E_n \cdot \exp\{j(\omega t - 2k_1 R_n - \varphi_n)\}, \quad (1)$$

где E_n и φ_n – мгновенные значения амплитуды и фазы поля n -го луча; R_n – протяжённость трассы локации по n -му лучу; $k_1 = \frac{\omega}{c}$; ω – круговая несущая частота; c – скорость света в вакууме.

При проведении дальнейших расчётов учтём, что поскольку ошибки вычисления R_n на основе известных моделей ионосферы превышающей длину волны [1], то расчётные методы не могут быть эффективно использованы для определения фазы отдельных лучей в декаметровом диапазоне радиоволн. Кроме того, поскольку неопределённость фазы отдельного луча обусловлена так же невозможностью точного знания характеристик многомасштабных неоднородностей ионосферы на трассе локации, то в этих условиях естественно допустить, что фазы принимаемых сигналов в каждом луче φ_n распределены по равномерному закону

$$\dot{E} = \sum_{n=1}^N E_n \cdot \exp\{j(\omega t + \varphi_n)\} \quad (2)$$

Рассмотрим искажения отдельного прямоугольного радиоимпульса при многолучевом приеме.

Пусть в раскрыве антенны интерферируют два радиоимпульса одинаковой длительности τ_n : $\dot{E}_1(t) = E_1 e^{j\varphi_1} \cdot e^{j\omega t}$ и $\dot{E}_2(t - \tau_{\text{зад}}) = E_2 e^{j\varphi_2} \cdot e^{j\omega t}$, причем второй запаздывает во времени относительно первого на $\tau_{\text{зад}}$. В результате на раскрыве антенны можно выделить три характерных участка (рис. 1):

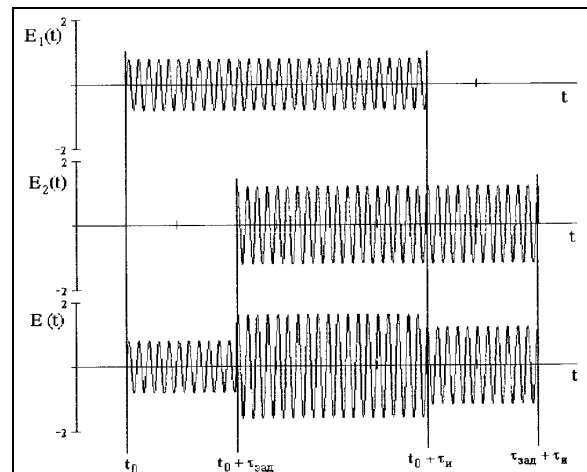


Рис. 1. Интерференция двух радиоимпульсов

1) от момента прихода фронта первого импульса до момента прихода фронта второго импульса (интервал $t_0...t_0+\tau_{\text{зад}}$). Амплитуда результирующего импульса в это время равна \dot{E}_1 ;

2) от момента прихода фронта второго импульса до момента прихода среза первого импульса (интервал $t_0+\tau_{\text{зад}}...t_0+\tau_n$). Амплитуда результирующего импульса в это время равна $\dot{E}_1 + \dot{E}_2$;

3) от момента прихода среза первого импульса до момента прихода среза второго импульса (интервал $t_0 + \tau_{и1} \dots \tau_{зад2} + \tau_{и2}$). Амплитуда результирующего импульса при этом равна \dot{E}_2 .

Рассмотрим временной интервал $t_0 + \tau_{зад1} \dots t_0 + \tau_{и1}$. Пусть в момент $\tau_{зад1}$ мгновенная фаза первого импульса равна нулю, а второй импульс имеет фазу $\Delta\phi$. Тогда комплексная амплитуда результирующего импульса определяется

$$\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = E_1 + E_2 \cos \Delta\phi + jE_2 \sin \Delta\phi, \quad (3)$$

а амплитуда

$$E = \sqrt{E_1^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\phi + E_2^2}. \quad (4)$$

Обозначим отношение амплитуд первого и второго импульса через k :

$$k = \frac{E_2}{E_1}. \quad (5)$$

Перепишем (4) в виде

$$E = E_1 \cdot \sqrt{1 + 2k \cos \Delta\phi + k^2}. \quad (6)$$

Видно, что при $k \gg 1$ (сигнал второго луча значительно интенсивнее первого) амплитуда результирующего импульса определяется амплитудой второго импульса: $E \approx k \cdot E_1 = E_2$. Если $k \ll 1$, то результирующий импульс определяется амплитудой первого сигнала: $E \approx E_1$. Наиболее интересна ситуация, когда $k \approx 1$. В этом случае результирующая амплитуда зависит от разности фаз между пришедшими сигналами и может быть как больше амплитуды отдельных импульсов, так и меньше ее (при $\Delta\phi \approx \pi$). При $\Delta\phi = 0$, $E = E_1 + E_2$, а при $\Delta\phi = \pi$, $E = |E_1 - E_2|$.

График зависимости амплитуды суммарного сигнала от разности фаз при $E_1 = 1$ приведен на рис. 2.

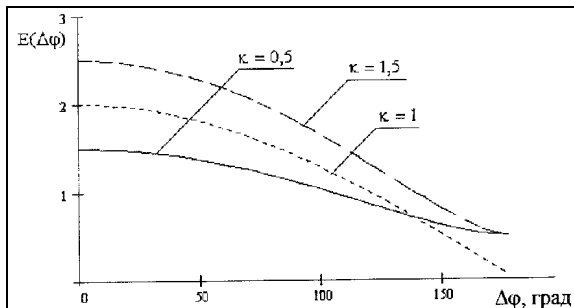


Рис. 2. Зависимость амплитуды суммарного импульса от разности фаз отдельных импульсов

Вычислим математическое ожидание суммарной амплитуды сигнала на раскрые при $k=1$ (в предположении равномерного закона распределения разности фаз):

$$\bar{E} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi E(\Delta\phi) d\phi = 1,27 \cdot E_1. \quad (7)$$

Рассмотрим огибающую пачки радиоимпульсов, пришедшей по двухлучевому пути. Ранее считали, что доплеровские частоты сигналов первого и второго

лучей одинаковы. В действительности из-за влияния ионосферы доплеровские частоты двух лучей отличаются. Поэтому результирующая пачка импульсов будет иметь амплитудную модуляцию двух видов: 1) вызванную искажением формы отдельного импульса; 2) образованную биением сигналов с различными доплеровскими частотами. На рис. 3 показана огибающая пачки радиоимпульсов, пришедшей по двухлучевому пути, для общего случая.

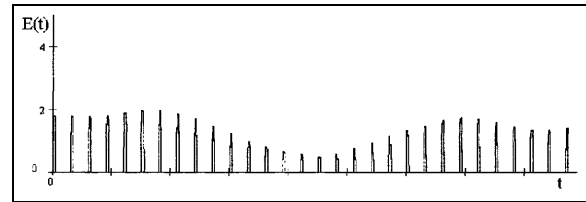


Рис. 3. Огибающая пачки радиоимпульсов при двухлучевом распространении

Для расчетов характеристик сигналов, распространяющихся по двухлучевому пути, использовалась математическая модель, которая предполагала следующее: время задержки сигналов распределено по нормальному закону, энергетическое отношение первого и второго лучей также распределено по нормальному закону, фазы сигналов распределены по равномерному закону. Для одной пачки радиоимпульсов эти параметры фиксированы. Каждый импульс характеризовался значениями трех амплитуд. После определения параметров каждого импульса рассчитывалась корреляционная функция сигнала и спектр амплитудных флуктуаций.

В качестве цели был выбран стратегический бомбардировщик В-2. Расчет производился для среднепересеченной местности для разных высот полетов. Для расчетов выбиралась пачка из 512 импульсов. Основные результаты расчетов следующие.

При полете цели на малых и средних высотах распределение амплитуды в выборке согласуется с равномерным распределением (по критерию согласия Колмогорова) со средним значением $E=1,9$. При увеличении высоты полета (3-5 км) распределения появляются полимодальные распределения амплитуды. При увеличении количества импульсов до 1500, что с физической точки зрения соответствует усреднению по реализациям земной поверхности, закон распределения становился равномерным. Для высоты полета 5 км вероятность распределения амплитуды в пачке из 512 импульсов по равномерному закону составляет 0,5, по полимодальному – 0,3. В остальных случаях наилучшее согласие обеспечивает закон Вейбулла и логнормальный закон. Это можно объяснить тем, что при полете цели на большой высоте амплитуда эхо-сигнала изменяется медленно (время корреляции может превышать 4 с). Если амплитуды сигналов в двух лучах значительно отличаются (например, в два раза), то возможны двух- или трехмо-

дальние распределения амплитуды. При полете цели на малых высотах время корреляции сигналов значительно меньше, они изменяются быстрее. Поэтому вероятность распределения амплитуды суммарного сигнала по полимодальному закону мала.

Ширина спектра амплитудных флуктуации двухлучевого сигнала определяется, прежде всего, видом амплитудной модуляции отдельного импульса. Чем сильнее искажается форма отдельного импульса, тем шире спектр амплитудных флуктуаций.

На рис. 4 представлена зависимость ширины спектра амплитудных флуктуаций на уровне 0,3 от высоты полета цели для ЭМВ горизонтальной и вертикальной поляризации.

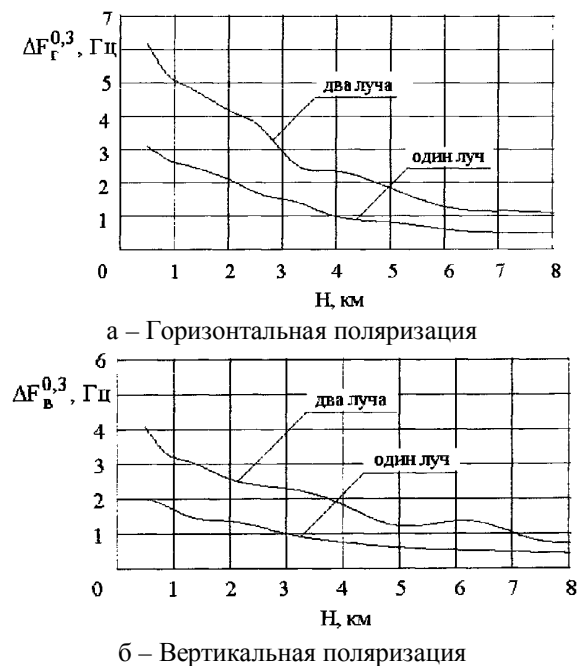


Рис. 4. Зависимость ширины спектра амплитудных флуктуаций на уровне 0,3 от высоты полета цели для ЭМВ горизонтальной и вертикальной поляризации

Для сравнения приведены данные для однолучевого распространения. Результаты усреднены по 5 пакетам радиопульсов. Видно, что ширина спектра амплитудных флуктуаций двухлучевого сигнала почти вдвое больше ширины спектра однолучевого сигнала/

Выводы

Наличие многолучевости на трассе распространения сигнала декаметрового диапазона радиоволн приводит к расширению спектра амплитудных флуктуаций принимаемого сигнала. В частности при двухлучевом распространении ширина спектра амплитудных флуктуаций принимаемого сигнала с горизонтальной, а также в вертикальной поляризации в два раза больше ширины спектра однолучевого сигнала аналогичной поляризации.

Список литературы

1. Основы загоризонтной радиолокации. В.А. Алебастров, Э.Ш. Гойхман, И.М. Заморин и др. / под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с., ил.
2. Катков Е.В. Результаты местоопределения объектов с помощью ЛЧМ ионозонда / В.А. Иванов, Е.В. Катков, А.А. Колчев // LVI Научная сессия, посвященная Дню радио. Труды РНТО РЭС им. А.С. Попова. – М., 2003. – Т. 2. – С. 265-267.
3. Катков Е.В. Реализация метода определения МП объекта по данным многочастотного НЗИ с использованием сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией / В.А. Иванов, Е.В. Катков // Всерос. науч. конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром, 2006. – С. 193-198

Поступила в редколлегию 18.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУНА-СИГНАЛІВ ДЕКАМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ РАДІОХВИЛЬ ПРИ ЇХ БАГАТОПРОМЕНЕВОМУ РОЗПОВСЮДЖЕННІ

В.Д. Карлов, Ю.А. Сірик, А.В.Тугай

У статті в рамках багатопроменевого механізму поширення сигналів декаметрового діапазону радіохвиль проаналізована залежність ширини спектру амплітудних флуктуацій сигналу відбитого від лоціруємої цілі від висоти польоту цілі і виду поляризації випромінюваних радіосигналів. Як лоціруєма ціль обраний стратегічний бомбардувальник В-2. Розрахунки проведені для середньоширотної іоносфери стосовно середньопересічної місцевості. Основна увага приділена двопроменевому механізму поширення радіосигналів.

Ключові слова: локація групових цілей, декаметровий діапазон радіохвиль, амплітудні флуктуації, багатопроменеве поширення.

HARACTERISTICS ECHO SIGNAL DECA-METER RANGE OF RADIO WAVES WITH HIZ MULTIPART PROPAGATION

V.D. Karlov, Y.A. Sirik, A.V. Tugay

In an article in the framework of the mechanism of multipart propagation of radio waves decameter analyzed the width of the spectrum of amplitude fluctuations of the signal reflected from the target of located on the target altitude and the type of polarization of the emitted radio signals. As of located targets selected strategic bomber B-2. Calculations were made for midlatitude ionosphere with respect to moderately areas. The focus is on two-beam propagation mechanism of radio signals.

Keywords: location group goals, decameter radio waves, the amplitude fluctuations, multipart propagation.