

С. В. Молостова, И. Б. Чернова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Рассматриваются вопросы зондирования ионосферы сложными сигналами. Оценивается эффективность применения сигналов с большой базой по сравнению с сигналами с базой порядка 1. Показано, что при использовании сложных сигналов можно существенно понизить мощность при сохранении неизменного уровня разрешения.

In the real work questions of sounding of an ionosphere are considered by difficult signals. Efficiency of use of signals with big base on an alignment with signals with base about 1 is estimated. It is shown that when using difficult signals it is possible to lower significantly capacity at preservation of invariable level of permission.

Ключевые слова: ионосферное зондирование, радиоимпульс, оценка параметров, вероятность обнаружения, база сигнала, сложные сигналы.

Key words: ionospheric sounding, radio impulse, assessment of parameters, probability of detection, base of the signal, difficult signals.

В настоящее время в системах локации и связи наряду с простыми сигналами используются сложные. Деление сигналов на простые и сложные обусловлено их базой B :



$$B = \Delta f_c T, \tag{1}$$

где $\Delta f_c = 1/T$ – половина ширины амплитудно-частотного спектра сигнала, зависящая от длительности сигнала T .

Для простых сигналов база сигнала $B = 1$, для сложных сигналов $B > 1$. Сложные сигналы создаются за счет внутриимпульсной модуляции. Это сигналы с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ-сигналы), на основе кодов Баркера и на основе m -последовательности радиоимпульсов. В результате внутриимпульсной модуляции ширина Δf_c амплитудно – частотного спектра увеличивается, и база сигнала становится больше единицы.

Импульс на рисунке 1 разбивается на m позиции, в каждой из которых фаза сигнала может принимать значения 0 или π согласно закону модуляции. В этом случае ширина частотного спектра сигнала увеличивается в m раз, $\Delta f_c = 1/\tau$, где τ – длительность одной позиции модулированного сигнала.

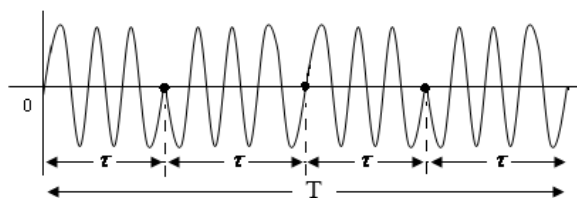


Рис. 1. Радиоимпульс длительностью T

Рассмотрим возможности применения сложных сигналов к области вертикального зондирования ионосферы. Запишем модулированный сигнал в виде

$$\hat{S}(\bar{\lambda}, t) = \hat{U}_0 e^{i\omega(t-t_0)} \mu(t), \quad t \in (t_0, t_0 + T), \tag{2}$$

где \hat{U}_0 – комплексная амплитуда сигнала; $\bar{\lambda}$ – вектор параметров сигнала; t_0 - время приема радиоимпульса; ω – круговая частота сигнала; $\mu(t)$ – закон модуляции сигнала (рис. 2).

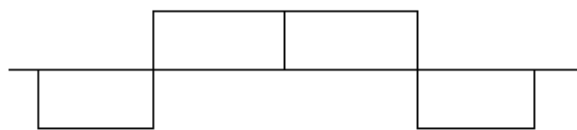


Рис. 2. Модулирующая функция сигнала $\mu(t)$

В случае ЛЧМ -сигналов модулирующей функцией будет

$$\mu(t) = e^{iA(t-t_0)^2}, \tag{3}$$

где $A = \frac{\omega_k - \omega_0}{T}$; ω_k – конечная частота; ω_0 – начальная частота сигнала.



Рассмотрим задачу оценки параметров для радиоимпульса с внутриимпульсной модуляцией. Запишем логарифм функции правдоподобия:

$$\ln(L(\bar{\lambda}')) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}'_0 e^{i\omega(t-t'_0)} \mu(t-t'_0)|^2 dt, \quad (4)$$

где штрихами отмечены оценочные параметры сигнала.

Дифференцируя выражение (4) по комплексной амплитуде \hat{U}'_0 и приравнявая дифференциал к нулю, можно получить уравнение правдоподобия. Оно дает оптимальную оценку амплитуды \hat{U}'_0 в зависимости от времени приема t'_0 :

$$\hat{U}'_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}(t) \mu(t-t'_0) e^{-i\omega(t-t'_0)} dt. \quad (5)$$

Математическое ожидание от оценочной амплитуды определяет следующее выражение:

$$M(\hat{U}'_0) = \frac{\hat{U}'_0}{T} e^{-i\omega(t_0-t'_0)} \int_0^T \mu(t-t_0) \mu(t-t'_0) dt. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что оценка амплитуды обуславливается корреляционной функцией модулирующих функций. Учитывая, что энергия модулирующей функции равна T , в точке $t'_0 = t_0$ математическое ожидание $M(\hat{U}'_0) = \hat{U}'_0$. Решение несмещенное. Если $t'_0 - t_0 \leq \tau$, тогда выражение (6) можно представить в виде

$$M(\hat{U}'_0) = \frac{\hat{U}'_0}{T} e^{-i\omega(t_0-t'_0)} \sum_{n=1}^N \int_{t_0}^{t'_0-\tau} \mu(t-t_0) \mu(t-t'_0) dt = \hat{U}'_0 e^{-i\omega(t_0-t'_0)} \left(1 - \frac{|t'_0 - t_0|}{\tau}\right). \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что полуширина корреляционной функции определяется длительностью одной позиции кода Баркера τ . Огибающая корреляционной функции имеет вид равнобедренного треугольника (рис. 3, 4). Максимум основного лепестка корреляционной функции превышает максимумы боковых лепестков в пять раз (количество позиций кода Баркера). При наличии в принятом сообщении второго сигнала с кодом Баркера два главных максимума будут раздельными, если $t'_0 - t_0 \leq \tau$. Это условие является классическим условием разрешения двух сигналов с кодами Баркера (рис. 5).

Разрешение оценивается длительностью одной позиции кода Баркера $\tau = 40$ мкс. Энергия сигнала при амплитуде, равной единице, соответствует длительности сигнала $T = 5 \cdot 10^{-4}$ Дж. Для получения такого же разрешения с помощью обычных радиоимпульсов длительностью 40 мкс требуется в 3,6 раза большая амплитуда радиоимпульса. При применении сигналов с кодами Баркера помехоустойчивость сильно возрастает. На рисунке 6 показан случай приема двух сигналов с 13-позиционным кодом Баркера при отношении «сигнал – шум» 7 дБ. Сигнал слабо просматривается на временной оси.

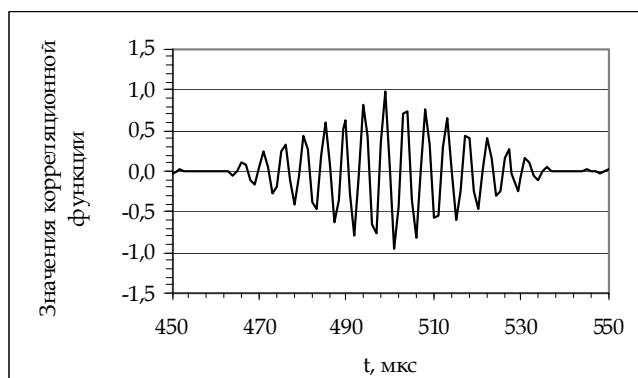


Рис. 3. Косинусное представление основного максимума корреляционной функции

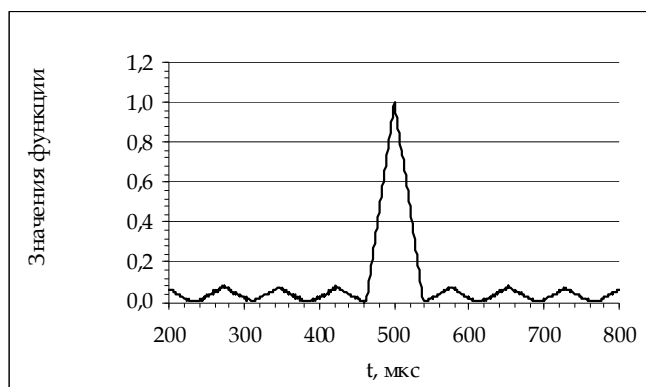


Рис. 4. Огибающая корреляционной функции пятиэлементного кода Баркера

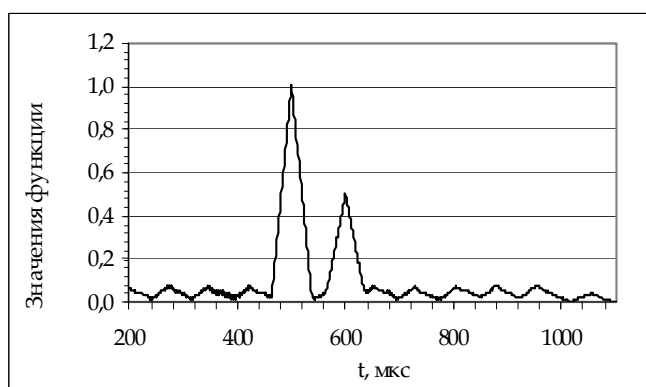


Рис. 5. Две корреляционные функции двух сигналов с 13-позиционным кодом Баркера при отношении «сигнал — шум» 27 дБ

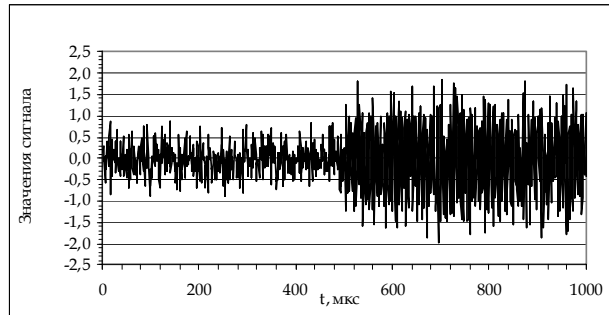


Рис. 6. Случай приема двух сигналов с 13-позиционным кодом Баркера при отношении «сигнал – шум» 7 дБ

Однако корреляционные функции, представленные на рисунке 7, позволяют получить достаточно точные значения времени приема и амплитуды сигнала.

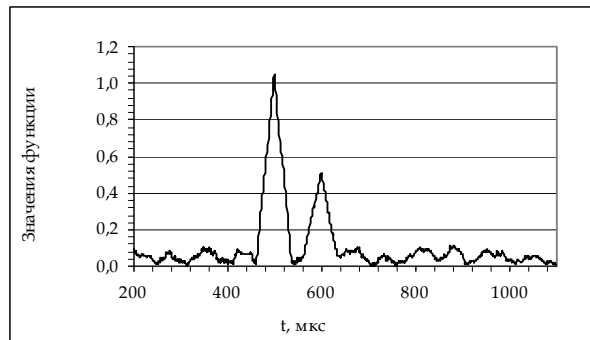


Рис. 7. Корреляционные функции двух сигналов при отношении «сигнал – шум» 7 дБ

При уменьшении отношения «сигнал–шум» до 0 дБ сигнал практически не виден на принятой реализации. Однако при корреляционной обработке (рис. 8) корреляционные максимумы первого и второго сигналов позволяют оценить времена приема сигналов и их амплитуды.

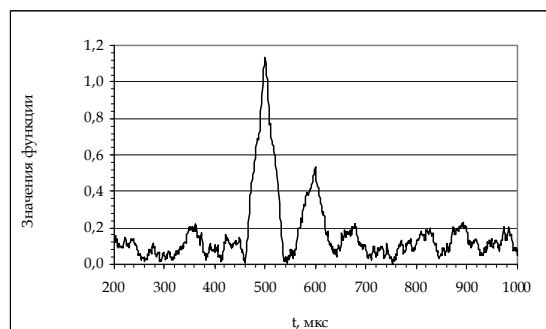


Рис. 8. Корреляционные функции двух сигналов при отношении «сигнал – шум» 0 дБ



Таким образом, сигналы на основе кодов Баркера могут быть использованы для вертикального зондирования ионосферы. По сравнению с моноимпульсным зондированием ионосферы мощность, подаваемая на антенну, может быть в 13 раз меньше при равенстве разрешающей способности. Ширина частотного спектра при моноимпульсном вертикальном зондировании и при использовании сигналов на основе кодов Баркера будет при этом одинакова.

Список литературы

1. *Перов А.И.* Статистическая теория радиотехнических систем. М., 2003.
2. *Тихонов В.И.* Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
3. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М., 2003.
4. *Гусев В.Д., Березин Ю.В., Бирюлин И.В.* Пеленгация ионосферных сигналов // Геомагнетизм и аэрномия. 1968. Т. 8, № 6. С. 69–72.

Об авторах

Светлана Валерьевна Молостова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Инна Борисовна Чернова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канга.

E-mail: chern. inna@rambler.ru

About authors

Svetlana Molostova — PhD, ass. prof., Department of telecommunications, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Inna Chernova, graduate, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: chern. inna@rambler.ru