

УДК 621.396.98

DOI 10.53403/9785951505170_2021_26_2_274

Исследования дисперсионных искажений прошедших через ионосферу Земли широкополосных сигналов радиолокационных систем и их обработки взаимно корреляционным методом

**М. М. Ивойлова*, В. А. Козлов*,
А. Л. Кунилов***

Исследована возможность обработки прошедших через ионосферу Земли сигналов с широким спектром – сверхкороткоимпульсных (СКИ), линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) и широкополосных шумовых (ШПШ) сигналов взаимно корреляционным методом. Получены численные оценки ожидаемых ошибок измерения дальности радиолокационными системами (РЛС).

Введение

К настоящему времени вопросы использования сигналов с широким спектром в бортовой радиолокационной аппаратуре космического базирования подробно и системно не исследованы. Наиболее важным среди них является определение оптимальных или близких к ним методов обработки отраженных сигналов, учитывающих дисперсионные искажения на ионосферной трассе.

Согласно теории оптимального приема первичная обработка в РЛС отраженных сигналов возможна методом согласованной фильтрации или методом взаимно корреляционной обработки (ВКО), основанном на определении взаимно корреляционной функции излучаемого и принимае-

* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

мого сигналов [1]. Наибольший практический интерес представляет исследование возможности применения метода ВКО, так как временные функции излучаемого и принимаемого сигналов при нахождении РЛС и цели в ионосфере Земли ввиду дисперсионных искажений существенно различаются.

Цель настоящей работы – исследование на основе общей методологии возможности обработки прошедших через ионосферу Земли сигналов с широким спектром – СКИ-, ЛЧМ- и ШПШ-сигналов методом ВКО, а также численные оценки ожидаемых ошибок измерения дальности. Исследования проводились с применением методов математического моделирования.

Математическая модель прохождения сигналов с широким спектром через ионосферу Земли

При распространении сигналов в ионосфере Земли происходит их взаимодействие со свободными электронами, вследствие чего наблюдаются искажения, связанные с дисперсиями фазовой скорости.

Для исследования искажений сигналов с широким спектром, связанных с дисперсией фазовой скорости, использовано волновое уравнение, описывающее распространение плоской волны в холодной плазме в высокочастотном приближении ($\partial/\partial\tau \gg c\partial/\partial z$) вида [2]

$$\frac{\partial^2 E}{\partial\tau\partial z} = -\frac{\omega_e^2(z)}{2c} E, \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля; $\omega_e^2 = 4\pi e^2 N_e/m_e$ – квадрат плазменной частоты; N_e – концентрация электронов в ионосфере; e – заряд электрона; m_e – масса электрона; $\tau = t - z/c$ – замена переменной.

Решение уравнения (1) имеет вид [2]

$$E = \frac{\partial}{\partial\tau} \int_0^\infty E_0(\tau - u) J_0 \left(2\sqrt{\frac{\Omega u}{\cos\theta}} \right) du, \quad (2)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; E_0 – падающая волна; θ – угол падения волны по отношению к нормали; $\Omega = \frac{1}{2c} \int_{h_0}^h \omega_e^2 dh$ – параметр, характеризующий «оптическую толщину» ионосферы, зависящий от высоты; h – высота.

Определение концентрации электронов N_e на заданных высотах осуществляется в соответствии с ГОСТ 25645.146-89 «Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов» при достижении максимального уровня концентрации электронов в ионосфере на средних широтах (наихудшие условия), наблюдающемся в марте в дневные часы, на 60° северной широты и 150° восточной долготы, при среднем значении числа Вольфа 150 (относительное число солнечных пятен).

Концентрация электронов в ионосфере N_e при заданных условиях меняется в пределах от $7,62 \cdot 10^{10}$ до $182 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, максимум концентрации достигается на высоте $h_{\text{МАК}} \sim 300 \text{ км}$.

Модели излучаемых и принимаемых сигналов

В качестве сигналов с широким спектром рассматривались:

- СКИ-сигнал в виде моноцикла Гаусса;
- ЛЧМ-сигнал с монотонно нарастающей частотой (ЛЧМН);
- ЛЧМ-сигнал с монотонно спадающей частотой (ЛЧМС);
- ШПШ.

Модель СКИ-сигнала в виде моноцикла Гаусса создавалась на основе спектральной $S_{\text{МГ}}(\omega)$ и временной $U_{\text{МГ}}(t)$ функций, определяемых соотношениями

$$S_{\text{МГ}}(\omega) = 2\pi e\omega^2 \rho^4 \exp[-\omega^2 \rho^2], \quad U_{\text{МГ}}(t) = \frac{(t_0 - t)\sqrt{e}}{\rho} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\rho^2}\right], \quad (3)$$

где ρ – параметр, определяющий длительность импульса; t_0 – сдвиг по времени.

Модели ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов создавались на основе спектральной $S_{\text{ЛЧМ}}(\omega)$ и временной $U_{\text{ЛЧМ}}(t)$ функций ЛЧМ-сигнала, определяемых соотношениями:

$$S_{\text{ЛЧМ}}(\omega) = \begin{cases} \pi a^2 (1 - \exp[b(\omega_n - \omega)/\mu])^2 / 2\mu, & \omega_0 - \Delta\omega/2 \leq \omega \leq \omega_0 - \omega_\phi, \\ \pi/2\mu, & \omega_0 - \omega_\phi < \omega < \omega_0 + \omega_\phi, \\ \pi a^2 (1 - \exp[-b(\tau_n \mu + \omega_n - \omega)/\mu])^2 / 2\mu, & \omega_0 + \omega_\phi \leq \omega \leq \omega_0 + \Delta\omega/2, \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{\text{ЛЧМ}}(t) = A(t) \cos(\omega_1 t \pm \mu t^2 / 2),$$

где $A(t) = \begin{cases} a(1 - \exp[-bt]), & 0 \leq t \leq \tau_\phi \\ 1, & \tau_\phi < t < \tau_n - \tau_\phi \\ a(1 - \exp[bt - b\tau_n]), & \tau_n - \tau_\phi \leq t \leq \tau_n \end{cases}$ – огибающая; $a = \frac{1}{1 - \exp[-c\tau_\phi]}$; b – крутизна

фронтов; μ – скорость изменения частоты радиоимпульса; ω_n и ω_0 – несущая и центральная частоты; $\Delta\omega$ – ширина спектра; τ_ϕ – длительность фронтов; τ_n – длительность радиоимпульса; $\omega_\phi = \Delta\omega(1/2 - \tau_\phi/\tau)$.

Модель ШПШ-сигнала создавалась на основе спектральной $S_{\text{НШ}}(\omega)$ и временной $U_{\text{НШ}}(t)$ функций нормального «белого» шума, определяемых соотношениями:

$$S_{\text{НШ}}(\omega) = \begin{cases} \int_0^{\tau_n} A(t)\xi(t)\exp(-j\omega t)dt, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2, \\ 0, & \omega < \omega_1, \quad \omega > \omega_2, \end{cases} \quad U_{\text{НШ}}(t) = A(t)\xi(t), \quad (5)$$

где τ_n длительность сигнала; ω_1 и ω_2 – нижняя и верхняя частоты спектра; $A(t)$ – медленно меняющаяся огибающая; $\xi(t)$ – стационарный Гауссов случайный процесс с ограниченным спектром и нулевым математическим ожиданием.

При моделировании рассматривался случай нахождения РЛС и цели на высотах ~ 300 км, соответствующих максимуму концентрации электронов в ионосфере (рис. 1), дальность до цели R составляла $R_1 = 600$ м и $R_2 = 6000$ м. Ширина спектров ЛЧМ и ШПШ излучаемых сигналов составляла $\Delta f \sim 0,6$ ГГц при центральной частоте $f_0 \sim 1$ ГГц, их длительность ~ 4 мкс. Длительность СКИ-сигнала составляла ~ 1 нс.

На рис. 1 приведены осциллограммы излучаемых и принимаемых сигналов при дальностях до цели $R_1 = 600$ м и $R_2 = 6000$ м.

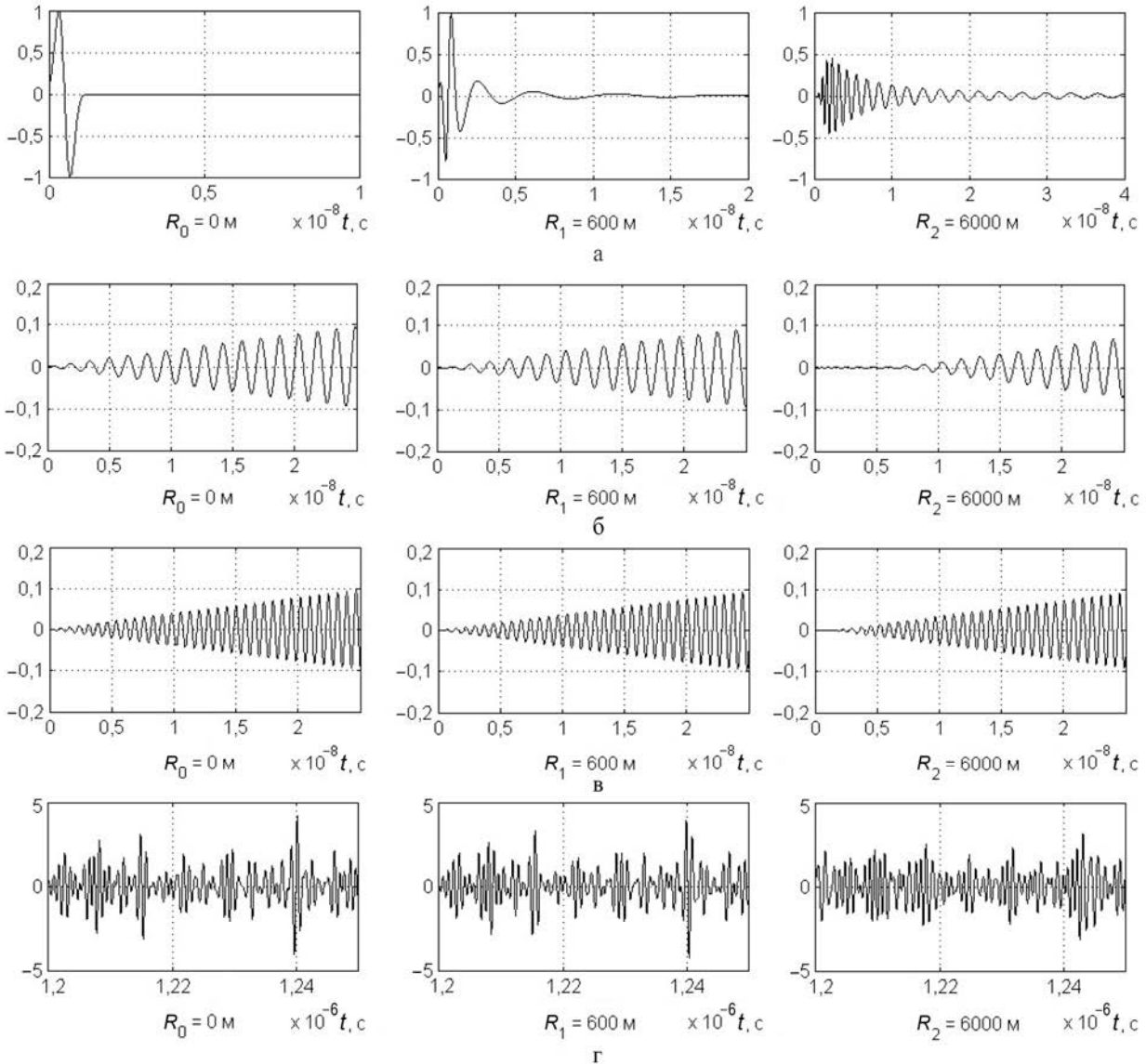


Рис. 1. Осциллограммы излучаемых ($R_0 = 0$ м) и принимаемых сигналов: а – СКИ-сигнала; б – и в – начальных участков ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов; г – ШПШ-сигнала

Теоретические исследования прохождения сигналов с широким спектром через ионосферу [2, 5, 6 и ГОСТ 25645.146-89] показали, что дисперсионные искажения приводят к значительным изменениям временной формы сигналов, вызванным смещением более низкочастотных спектральных составляющих вправо по временной оси. Для СКИ-сигнала характерно преобразование излучаемого моноцикла Гаусса в ЧМ-радиоимпульс, для ЛЧМН-сигнала – первоначальное уменьшение длительности с увеличением амплитуды и последующее растяжение во времени при дальнейшем распространении. Для ЛЧМС- и ШПШ-сигналов дисперсионные искажения проявляются в виде увеличения их длительности при уменьшении амплитуды. Для всех рассматриваемых видов сигналов наблюдается дополнительное запаздывание при распространении в ионосфере, связанное с дисперсией фазовой скорости сигналов. Форма огибающей энергетических спектров рассматриваемых сигналов после прохождения через ионосферу Земли почти не изменяется.

Модель радиолокационной системы с обработкой сигналов методом взаимно корреляционной обработки

Взаимно корреляционный метод обработки сигнала основан на процедуре определения взаимно корреляционной функции $K(\tau_0)$ принимаемого $U(t)$ и задержанного излучаемого (опорного) $U_0(t - \tau_0)$ сигналов, реализуемой многоканальным коррелятором.

Значение корреляционного интеграла для детерминированных сигналов в виде СКИ- и ЛЧМ-сигналов можно определить как

$$K(\tau_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t)U_0(t, \tau_0)dt, \tag{6}$$

где τ_0 – задержка опорного сигнала в ШЛЗ.

Для ШПШ-сигнала будем рассматривать среднее значение корреляционного интеграла $M\{K(\tau_0)\}$.

Модель РЛС с обработкой сигнала методом ВКО представлена на рис. 2.

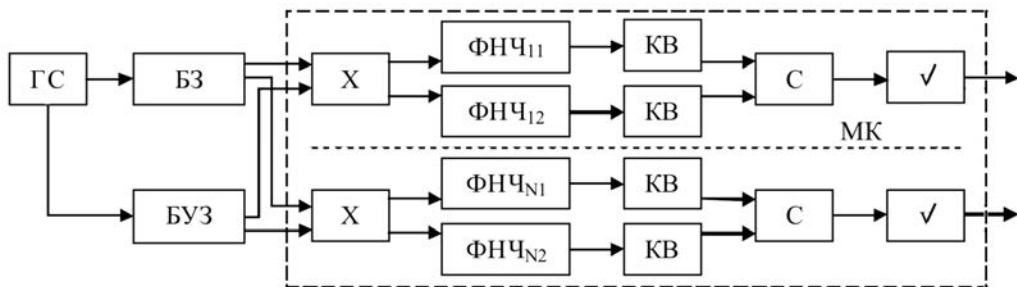


Рис. 2. Схема модели РЛС с обработкой сигнала методом ВКО: ГС – генератор сигнала, БЗ – блок задержки, БУЗ – блок управляемой задержки, X – квадратурные множители, ФНЧ – фильтры низкой частоты, КВ – квадраторы, С – сумматоры, √ – устройства извлечения квадратного корня

Для исключения зависимости амплитуды выходных сигналов от начальной фазы в модели РЛС каналы МК построены на основе квадратурного принципа.

Результаты моделирования обработки принимаемых сигналов радиолокационных систем со взаимно корреляционной обработкой

Исследования приема сигналов с учетом искажений при прохождении через ионосферу Земли проводились с использованием модели РЛС, приведенной на рис. 2.

На рис. 3,а приведены результаты моделирования работы РЛС для излучаемого СКИ-сигнала; на рис. 3,б – для излучаемых ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов; на рис. 3,в – для излучаемого ШПШ-сигнала.

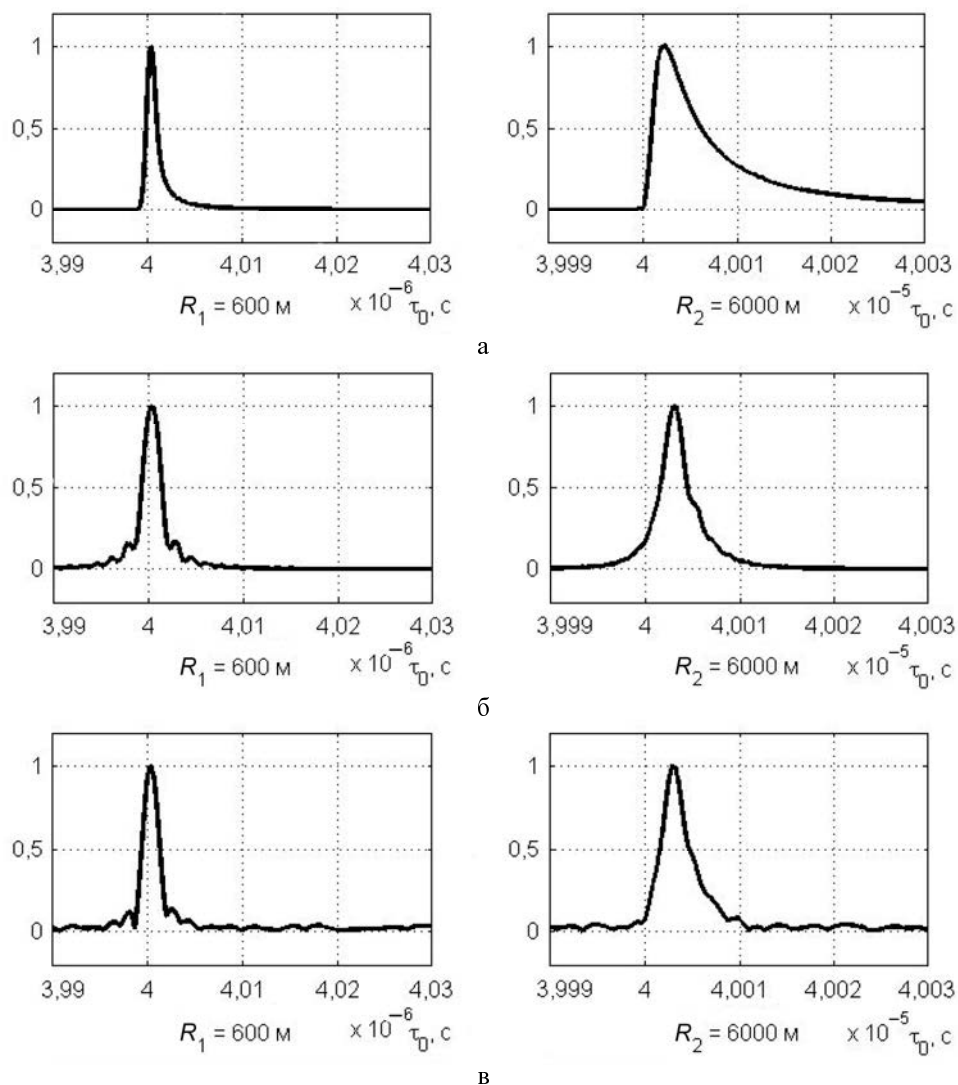


Рис. 3. Результаты моделирования работы РЛС для излучаемых: а – СКИ-сигнала; б – ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов; в – ШПШ-сигнала

На рис. 3 видно, что искажение СКИ-сигнала при прохождении через ионосферу приводит к несимметричному расширению корреляционной функции преимущественно в область больших

задержек и смещению ее максимума в ту же область. Искажения ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов приводят к идентичным искажениям их корреляционных функций в виде почти симметричного их расширения и несколько большему по сравнению с корреляционной функцией СКИ-сигнала смещению их максимумов в область больших задержек. Искажение ШПШ-сигнала приводит к расширению корреляционной функции и смещению ее максимума в область больших задержек на величину, примерно равную величине смещения максимумов корреляционных функций для ЛЧМН- и ЛЧМС-сигналов.

Наблюдаемое смещение определяемого расстояния до цели является одинаковым для ЛЧМН-, ЛЧМС- и ШПШ-сигналов и для $R_2 = 6000$ м составляет $\sim 0,45$ м в большую сторону; для СКИ-сигнала смещение для $R_2 = 6000$ м составляет $\sim 0,3$ м. Таким образом, величина смещения зависит от относительной полосы частотного спектра рассматриваемого сигнала.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали возможность обработки в бортовых РЛС методом ВКО сигналов с широким спектром с учетом их дисперсионных искажений на ионосферной трассе.

Для всех видов рассмотренных сигналов при обработке методом ВКО наблюдается расширение взаимно корреляционной функции со смещением ее главного максимума в область больших задержек, т. е. полученные результаты измерений дальности до цели будут являться завышенными. Численные оценки показали, что для СКИ-сигнала ошибка измерения дальности РЛС меньше, чем для ЛЧМ- и ШПШ-сигналов. Величина необходимой поправки к измеренной дальности пропорциональна дальности до цели.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке бортовых РЛС, определяющих дальность до целей, находящихся в пределах ионосферы.

Список литературы

1. Радиоприемные устройства / Под ред. А. П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989.
2. Белов А. С., Яркина Е. Ю. Особенности распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в ионосфере Земли // Труды XIV научной конференции по радиофизике. Н. Новгород: ННГУ, 2010. С. 16–17.
3. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2 Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13, № 4. С. 270–322.
4. Катин С. В., Козлов В. А., Кунилов А. Л., Ивойлова М. М. Искажения сигналов СШП-шумовых РЛС на ионосферной трассе и их влияние на качество приема // Антенны. 2016. Вып. 1 (221). С. 68–75.
5. Петренко П. Б., Бонч-Бруевич А. М. Моделирование и оценка ионосферных искажений широкополосных радиосигналов в локации и связи // Вопросы защиты информации. 2007. № 3. С. 24–29.

Dispersion Distortions Research of the Broadband Signals During Their Spread in the Earth Ionosphere and Processing Features of Such Signals with Cross-Correlation Method Noboard Radar

M. M. Ivoylova, V. A. Kozlov, A. L. Kunilov

In this article on the basis of common methodology, there is researched the possibility of cross-correlation method processing of wide spectrum signals passing through the Earth ionosphere: ultrashort pulses, chirp radio-frequency pulses and broadband noise signals. The radar distance measurement expected error number estimates are obtained.