

Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 621.396.96

С.Т. Багдасарян¹, В.Р. Хачатуров¹, В.А. Васильев²

¹ Государственное предприятие МО Украины «НИИ РЭТ», Харьков

² Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ТОЧНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ, ЧАСТОТЫ И ПАРАМЕТРА ИОНОСФЕРЫ ПРИ ПРИЕМЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрены точности совместного измерения параметра интегральной электронной концентрации и частоты, а также совместного измерения времени запаздывания, параметра интегральной электронной концентрации и частоты при приеме широкополосного сигнала с произвольной длительностью и учете априорной информации о концентрации электронов ионосферы. Приведены результаты анализа влияния априорных данных и параметров сигнала на точности оценок.

Ключевые слова: параметры, ионосфера, электронная концентрация, измерение, коррекция, матрица точности, адаптация.

Введение

Ионосфера, как диспергирующая среда, вызывает искажения распространяющихся в ней сигналов тем большие, чем шире полоса частот сигнала [1–4]. Она в некоторых приложениях может существенно снизить выигрыш, получаемый за счет использования широкополосных сигналов. Между тем искажения сигналов, связанные с их распространением в среде, являются физической основой для измерения параметров ионосферы [2]. Результаты этих измерений могут быть использованы для адаптивной компенсации искажений сигналов и измерения их параметров. Обсуждение этих возможностей в известной литературе проводится без учета и с учетом априорных данных [5, 6]. Оценка параметров широкополосного сигнала без учета априорных данных часто приводит к неправильным выводам. Оценка с учетом априорных данных об интегральной концентрации электронов ионосферы получена применительно к сигналам малой длительности без учета рассогласования по частоте [5, 6]. Однако применяемые на практике широкополосные частотно-модулированные и фазоманипулированные сигналы обладают и широким спектром, и большой длительностью. Совместное оценивание параметров таких сигналов, в развитие [5, 6], представляет научный и практический интерес.

Цель работы – анализ точности совместного оценивания времени запаздывания, параметра интегральной электронной концентрации и частоты в разных сочетаниях при приеме широкополосного сигнала произвольной длительности и учете априорной электронной концентрации ионосферы.

Основной материал

1. Функция рассогласования сигнала, прошедшего ионосферу. Каждая гармоническая составляющая $g(f)$ сигнала наряду со смещениями по време-

ни $t = t_{зс}$ и доплеровской частоте $F = F_{дс}$ в ионосфере приобретает случайный сдвиг по фазе. Сигнал определяется интегралом от спектральной плотности

$$g(f - F_{дс}) \exp[-j2\pi(f t_{зс} - \gamma_{ис} / f)], \quad (1)$$

где $\gamma_{ис} \approx 40,3(n_e)_{инт} / c$ – параметр интегральной электронной концентрации $(n_e)_{инт}$ на пути распространения (двустороннего при активной локации) в изогнутом столбе площадью 1 м^2 ; c – скорость света.

Представление (1) справедливо для сигналов с эффективной полосой частот $\Pi_{эф}$ и несущей частотой $f_0 \gg \Pi_{эф}$, $f_0 > f_{кр}$, где $f_{кр}$ – критическая частота ионосферы, а $f_0 > 600$ МГц. Последнее условие практически исключает влияние магнитного поля Земли на дисперсионные искажения сигнала. В (1) также не учитываются искажения сигнала, связанные с переходом к разрешению элементов цели.

Частотная характеристика согласованного приемника пропорциональна комплексно-сопряженному выражению (1) с малыми рассогласованиями τ , F и γ параметров, т.е. $t_3 = t_{зс} + \tau$, $F_d = F_{дс} + F$ и $\gamma_{и} = \gamma_{ис} + \gamma$. Нормированный результат обработки сигнала на выходе приемника в комплексном виде определяется выражением

$$\rho(\tau, F, \gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} g(f) g^*(f + F) e^{j2\pi(f\tau - \gamma f)} df / \int_{-\infty}^{\infty} |g(f)|^2 df. \quad (3)$$

С учетом искажений по времени группового запаздывания лишь первого порядка имеем:

$$f = f_0 + v, \quad g(f) = g(f_0 + v) \equiv G(v),$$

$$1/f = (1/f_0) - v/f_0^2 + v^2/f_0^3 = (1/f_0) - f_0^{-3} (vf_0 - v^2).$$

При этих приближениях с учетом (3) можно получить трехмерную нормированную функцию рассогласования

$$\rho(\tau, F, \gamma) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} G(v) G^*(v+F) e^{j2\pi(v\tau + \gamma t_0^{-3}(v t_0 - v^2))} dv \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |G(v)|^2 dv}. \quad (4, a)$$

Ненормированный выходной эффект согласованного приемника также выражается через функцию (4а). Так, согласованный приемник при большом отношении сигнал-шум и измерении неэнергетических параметров сигнала со случайной, равновероятной начальной фазой формирует модуль корреляционного интеграла

$$|Z(\tau, \gamma, F)| \approx q^2 \rho(\tau, F, \gamma), \quad (4, б)$$

где q^2 – параметр обнаружения.

Ниже (4, а) и (4, б) используется для вычисления точности регулярного измерения.

2. Расчет точности совместного регулярного измерения параметров сигнала с учетом априорных данных. Точность измерения определяется элементами главной диагонали корреляционной матрицы ошибок C^{-1} , обратной матрице точности C . При гауссовской априорной (доопытной) статистике измеряемых параметров матрица C определяется суммой матиц точности доопытного C_d и текущего C_y оценивания [6]. В силу (4б) матрица C_y выражается через q^2 и вторые производные функции $\rho(\tau, \gamma, F)$ в точке $\tau = 0, \gamma = 0, F = 0$. Полученная таким образом матрица C_y справедлива и для когерентных сигналов со случайными релеевской амплитудой и равновероятной начальной фазой [6]. В матрице C_d можно задать величину $\sigma_{\gamma \text{дооп}}^{-2}$, обратную доопытной дисперсии параметра γ , а остальные элементы нулевыми. Тогда матрица точности примет вид

$$C = C_d + C_y = q^2 \begin{pmatrix} \left| \rho''_{\tau\tau} \right| & \left| \rho''_{\tau\gamma} \right| & \left| \rho''_{\tau F} \right| \\ \left| \rho''_{\tau\gamma} \right| & \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| & \left| \rho''_{\gamma F} \right| \\ \left| \rho''_{\tau F} \right| & \left| \rho''_{\gamma F} \right| & \left| \rho''_{FF} \right| \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $\left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| = q^{-2} (\sigma_{\gamma 0}^{-2} + \sigma_{\gamma \text{дооп}}^{-2})$,

$\sigma_{\gamma 0}^{-2} = q^2 \left| \rho''_{\gamma} \right|$ – обратная величина дисперсии независимого текущего измерения γ .

Из (5) можно выделить две матрицы

$$C_1 = q^2 \begin{pmatrix} \left| \rho''_{\tau\tau} \right| & \left| \rho''_{\tau\gamma} \right| \\ \left| \rho''_{\tau\gamma} \right| & \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| \end{pmatrix}, \quad C_2 = q^2 \begin{pmatrix} \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| & \left| \rho''_{\gamma F} \right| \\ \left| \rho''_{\gamma F} \right| & \left| \rho''_{FF} \right| \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрица C_1 характеризует точность совместного измерения времени запаздывания сигнала и параметра электронной концентрации при известной частоте сигнала [5, 6]. Элементы главной диагонали матрицы C_2^{-1} , обратной C_2 , определяют дисперсии ошибок совместного измерения параметра электронной концентрации σ_{γ}^2 и частоты σ_F^2 при известном запаздывании сигнала:

$$\sigma_{\gamma}^2 = 1/q^2 \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| (1 - k_{\gamma F}^2), \quad (8)$$

$$\sigma_F^2 = 1/q^2 \left| \rho''_{FF} \right| (1 - k_{\gamma F}^2) = \sigma_{F0}^2 / (1 - k_{\gamma F}^2), \quad (9)$$

где $k_{\gamma F} = \left| \rho''_{\gamma F} \right| / \sqrt{\left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| \left| \rho''_{FF} \right|}$ – коэффициент корреляции ошибок измерения γ и F ,

$$\sigma_{F0}^2 = 1/q^2 \left| \rho''_{FF} \right| \quad (11)$$

дисперсия независимого измерения частоты.

Аналогично, обращая матрицу (5), находим дисперсии ошибок совместного измерения времени запаздывания σ_{τ}^2 , параметра электронной концентрации σ_{γ}^2 и частоты σ_F^2 :

$$\sigma_{\tau}^2 = \sigma_{\tau 0}^2 (1 - k_{\tau\gamma}^2) / D, \quad (12)$$

$$\sigma_{\gamma}^2 = (1 - k_{\tau\gamma}^2) / (q^2 \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right| D), \quad (13)$$

$$\sigma_F^2 = \sigma_{F0}^2 (1 - k_{\tau F}^2) / D, \quad (14)$$

$$D = 1 - k_{\tau\gamma}^2 - k_{\tau F}^2 - k_{\gamma F}^2 + 2k_{\tau\gamma} k_{\tau F} k_{\gamma F}, \quad (15)$$

где $k_{\tau\gamma} = \left| \rho''_{\tau\gamma} \right| / \sqrt{\left| \rho''_{\tau\tau} \right| \left| \rho''_{\gamma\gamma} \right|}$, $k_{\tau F} = \left| \rho''_{\tau F} \right| / \sqrt{\left| \rho''_{\tau\tau} \right| \left| \rho''_{FF} \right|}$ –

коэффициенты корреляции ошибок измерений τ и γ , τ и F , а $\sigma_{\tau 0}^2 = 1/q^2 \left| \rho''_{\tau\tau} \right|$ – дисперсия независимого измерения времени запаздывания.

3. Анализ точности измерения параметров ЛЧМ сигналов при различных априорных данных. На основе расчетных соотношений (4а) - (16), рассмотрим пример анализа точности совместного регулярного измерения параметров линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) радиосигналов при колокольных моделях спектров

$$G(f) = |G(v)| e^{j \arg G(v)}, \quad (17)$$

где $|G(v)| \approx e^{-pv^2/2}$,

$$\arg G(v) = -\pi n (v / \Delta v)^2 + \arctg n / 2. \quad (18, б)$$

Здесь Δv – ширина спектра сигнала с длительностью τ_n , а $n = \Delta v \tau_n$ – коэффициент широкополосности [6].

Вводя эффективную полосу частот $\Pi_{\text{эф}} = \sqrt{\left| \rho''_{\tau\tau} \right|}$ и используя модель (17) в (4а), можно найти

$p = 2\pi^2 / \Pi_{\text{эф}}^2$, где $\Pi_{\text{эф}}^2 = \pi(n^2 + 1) / \tau_{\text{и}}^2$. Аналогично эффективная длительность сигнала $\tau_{\text{эф}} = \sqrt{|\rho_{\text{F}}''|} = \sqrt{\pi} \tau_{\text{и}}$. Используя [7], также можно получить

$$|\rho_{\gamma}''| = \frac{\Pi_{\text{эф}}^2}{f_0^4} + \frac{1}{2\pi^2} \frac{\Pi_{\text{эф}}^4}{f_0^6}, \quad |\rho_{\gamma\text{F}}''| = \pi n / f_0^2.$$

С учетом этих соотношений при известном времени запаздывания сигнала (8) и (9) соответственно можно представить так:

$$\sigma_{\gamma}^2 = \left(\frac{1}{\sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2} + \frac{1}{2\pi^2} q^2 \frac{\Pi_{\text{эф}}^4}{f_0^6} \right)^{-1}, \quad (19)$$

$$\sigma_{\text{F}}^2 = \frac{1}{q^2 \tau_{\text{эф}}^2} \frac{1 + q^2 \sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2 \left(\frac{\Pi_{\text{эф}}^2}{f_0^4} + \frac{1}{2\pi^2} \frac{\Pi_{\text{эф}}^4}{f_0^6} \right)}{1 + \frac{1}{2\pi^2} q^2 \sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2 \frac{\Pi_{\text{эф}}^4}{f_0^6}}. \quad (20)$$

Из (19) и (20) в «высокочастотном» (ВЧ) приближении для частот $f_0 \gg (q\sigma_{\gamma \text{ дооп}} \Pi_{\text{эф}})^{1/2}$ можно получить

$$\sigma_{\gamma}^2 = \sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2, \quad \sigma_{\text{F}}^2 = \frac{1}{q^2 \tau_{\text{эф}}^2} \left(1 + \frac{q^2 \sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2 \Pi_{\text{эф}}^2}{f_0^4} \right). \quad (21)$$

В другом предельном «низкочастотном» (НЧ) приближении для частот f_0 , удовлетворяющих условию $f_{\text{кр}} < f_0 \ll \sqrt{q\sigma_{\gamma \text{ дооп}} \Pi_{\text{эф}}}$, можно найти:

$$\sigma_{\gamma}^2 = 2\pi^2 \frac{f_0^6}{q^2 \Pi_{\text{эф}}^4}, \quad \sigma_{\text{F}}^2 = \frac{1}{q^2 \tau_{\text{эф}}^2} + \frac{2\pi^2 f_0^2}{q^2 \tau_{\text{эф}}^2 \Pi_{\text{эф}}^2}. \quad (22)$$

В (19), (20) и (21) доопытную дисперсию $\sigma_{\gamma \text{ дооп}}^2$ можно определить через распределение интегральной электронной концентрации $(n_e)_{\text{инт}}$, например, на интервале $(10^{16}, 10^{18}) \text{ м}^{-2}$. Для нормального распределения выбираем среднеквадратическую ошибку (СКО) $\sigma_{\text{пен}} = 16,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$. При этом 98% случайных значений $(n_e)_{\text{инт}}$ укладываются на заданном интервале. В силу (2) для параметра электронной концентрации γ получим

$$\sigma_{\gamma \text{ дооп}} = \left(\frac{40,3}{c} \right) \sigma_{\text{пен}} = 2,22 \cdot 10^{10} \text{ Гц}.$$

Согласно (22) дисперсия σ_{γ}^2 без использования доопытной информации об электронной концентрации $\sigma_{\gamma \text{ дооп}}$ с ростом частоты f_0 возрастает по квадратичному закону. С использованием (19) на рис. 1 приведена зависимость σ_{γ} от частоты f_0 для $q^2 = 50$, $\sigma_{\gamma \text{ дооп}} = 2,22 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ и двух значений

$\Pi_{\text{эф}}$. С увеличением f_0 значение $\sigma_{\gamma} \rightarrow \sigma_{\gamma \text{ дооп}}$, что согласуется с (21). По мере накопления данных в следящей системе γ [6] СКО $\sigma_{\gamma \text{ дооп}}$ уменьшается.

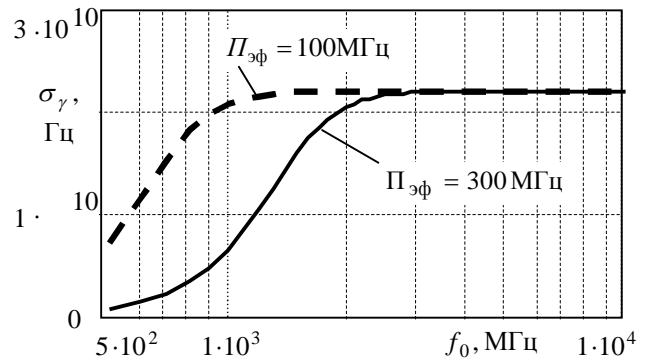


Рис. 1. Зависимости СКО измерения γ от параметров сигнала

Выражения дисперсии ошибок измерения частоты σ_{F}^2 (20), (21) и (22) содержат потенциальную (без учета влияния ионосферы) $\sigma_{\text{F}0}^2 = 1/q^2 \tau_{\text{эф}}^2$ и ионосферную составляющие. На основе (20) зависимость СКО σ_{F} от частоты f_0 для $\sigma_{\gamma \text{ дооп}} = 2,22 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$, $q^2 = 50$, $\tau_{\text{и}} = 200 \text{ мкс}$ и двух значений $\Pi_{\text{эф}}$ приведена на рис. 2.

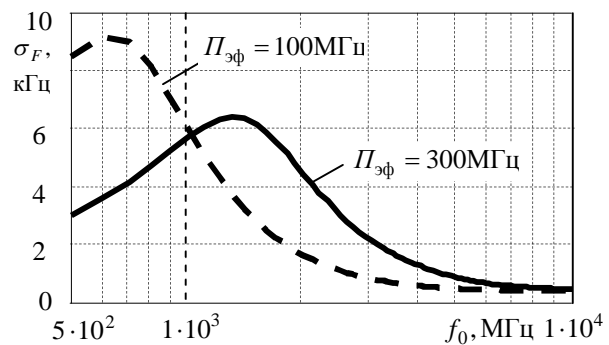


Рис. 2. Зависимости СКО измерения частоты от параметров сигнала

Значение σ_{F} зависит от диапазона частот. В верхнем диапазоне с увеличением f_0 СКО σ_{F} (рис. 2) и ее ВЧ приближение (рис. 3), монотонно снижаясь, стремятся к потенциальной $\sigma_{\text{F}0}$.

В НЧ приближении ионосферная ошибка измерения частоты превалирует над потенциальной, формула (22) принимает вид $\sigma_{\text{F}}^2 \approx 2\pi^2 f_0^2 / (q^2 \tau_{\text{эф}}^2 \Pi_{\text{эф}}^2)$ и σ_{F} возрастает с увеличением f_0 (рис. 3), тогда как она должна уменьшаться и без коррекции ионосферной ошибки. Противоречие связано с тем, что НЧ приближение, как и оценка частоты по максимуму правдоподобия, не учитывает ограничения электронной концентрации реаль-

ной ионосферы. Кривые рис. 3 характерны и для СКО измерения времени запаздывания σ_τ при известной частоте сигнала.

Переходя к анализу точности совместного измерения времени запаздывания, параметра интегральной электронной концентрации и частоты, можно показать, что в (15)

$$k_{\tau\gamma} = k_{\gamma F}, k_{\tau F} = \left| \rho_{\tau F}'' / \sqrt{\rho_\tau'' \rho_F''} \right| = n / \sqrt{n^2 + 1}. \quad (23)$$

Используя эти соотношения и замену $\sqrt{n^2 + 1} = n + 1/2n$, выражение (15) приведем к виду

$$D = (1 - k_{\gamma F}^2) / (n^2 + 1). \quad (24)$$

Тогда из (12) находим

$$\sigma_\tau^2 = \sigma_{\tau 0}^2 (n^2 + 1). \quad (25)$$

Согласно (25) при отсутствии априорных данных о частоте СКО измерения времени запаздывания ЛЧМ сигнала, как и в случае отсутствия ионосферной ошибки [6], возрастает относительно потенциальной $\sigma_{\tau 0}$ в $\sqrt{n^2 + 1} \approx n$ раз. Если доплеровские уходы частоты в системе слежения вызывают заметно меньшие смещения относительно σ_τ , полученной для совместного измерения времени запаздывания и параметра электронной концентрации при известной частоте [5, 6], то дисперсия σ_τ^2 получается гораздо меньше, чем дает (25).

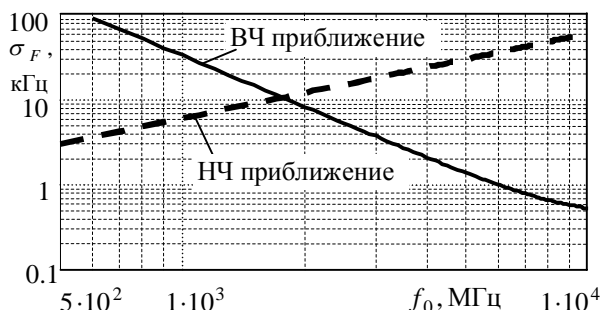


Рис. 3. Кривые СКО измерения частоты в ВЧ и НЧ приближениях

С учетом (23) и (24) выражение дисперсии σ_γ^2 (13) для случая совместного измерения τ, γ и F также приобретает вид (8), которое преобразуется к виду (19). Формула (19) справедлива и для совместного измерения τ и γ при известной частоте [5, 6]. Значение σ_γ^2 зависит от априорной информации $\sigma_{\gamma дооп}^2$, энергетического отношения сигнал-шум, эффективной полосы Π_Φ и несущей частоты f_0 сигнала.

Из (10) и (16) можно показать, что $k_{\tau\gamma} = k_{\gamma F}$. Используя это и (24) в (14), находим

$$\sigma_F^2 = \sigma_{F0}^2 (n^2 + 1). \quad (26)$$

При $n \gg 1$ дисперсия (26) намного больше (20), полученной для совместного измерения параметра электронной концентрации и частоты при известном времени запаздывания. Однако накопление в комбинированной системе слежения данных времени запаздывания, электронной концентрации и частоты позволит снизить ошибки их измерения.

4. Пример адаптивной коррекции искажений ЛЧМ сигнала. Результаты измерений интегральной электронной концентрации γ ионосферы могут быть использованы для адаптивной коррекции дисперсионных искажений широкополосного ЛЧМ сигнала в приемнике [5, 6] и передатчике (рис. 4).

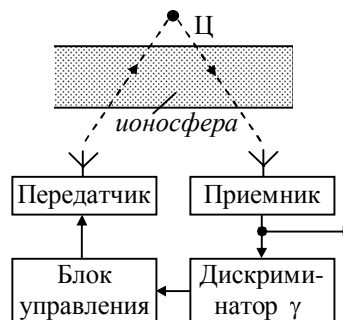


Рис. 4. Коррекция ЛЧМ сигнала в передатчике

При наличии некомпенсированных искажений ионосферы на выходе дискриминатора γ рис. 4 формируется сигнал ошибки, который через блок управления воздействует на передатчик, вводя предискажения закона модуляции сигнала так, чтобы компенсировать искажения в ионосфере. Приемник же рассчитан на согласованный прием отраженного сигнала без учета среды его распространения.

Выводы

Проведенный анализ точности совместного оценивания параметров широкополосного сигнала, прошедшего через ионосферу, в различных сочетаниях показывает, что правильные зависимости точности от частоты сигнала получаются при учете априорных данных ионосферы. На точность измерения времени запаздывания сигнала также влияют априорные данные его частоты и наоборот.

Полученные результаты пригодны для практических расчетов точности регулярного измерения времени запаздывания, параметра интегральной электронной концентрации и частоты ЛЧМ сигнала. Точность измерения времени запаздывания (частоты) зависит от точности данных других параметров. Накопление в следящих системах информации о параметрах сигнала позволит уточнить модель ионосферы по эффекту дисперсии, осуществить адаптивную компенсацию искажений сигнала ионосферой, повысить точности измерений времени запаздывания и частоты сигнала.

Авторы выражают признательность Я.Д. Ширману за внимание к работе и советы.

Список литературы

1. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. – М.: ГТТЛ, 1953.
2. Ширман Я.Д. Анализ прохождения импульсных сигналов через дисперсионные задерживающие системы / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос // Труды АРТА. – 1958. – № 35.
3. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Винаградов. – М.: Радио и связь, 1983.
4. Современная радиолокация / Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969.
5. Bagdasaryan S.T. Estimation of time delay and ionosphere parameters... / S.T. Bagdasaryan, Y.D. Shirman //

Proc. of int. conf. "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals", Sept., 2006, Sevastopol, Ukraine.

6. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007.
7. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1971.

Поступила в редколлегию 7.02.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ТОЧНІСТЬ СУМІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЧАСУ ЗАПІЗНЕННЯ, ЧАСТОТИ ТА ПАРАМЕТРУ ІОНОСФЕРИ ПРИ ПРИЙМАННІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

С.Т. Багдасарян, В.Р. Хачатуров, В.А. Васильєв

Розглянуті точності сумісного вимірювання параметра інтегральної електронної концентрації та частоти, а також сумісного вимірювання часу запізнєння, параметра інтегральної електронної концентрації та частоти при прийманні широкосмугового сигналу з довільною тривалістю та врахуванні апріорної інформації про концентрацію електронів іоносфери. Наведені результати аналізу впливу апріорних даних та параметрів сигналу на точності оцінок.

Ключові слова: параметр, іоносфера, електронна концентрація, измерение, корекція, матриця точності, адаптація.

ACCURACIES OF JOINT MEASURING OF TIME DELAY, FREQUENCY AND IONOSPHERE PARAMETER IN THE CASE OF WIDEBAND SIGNAL RECEIVING

S.T. Bagdasaryan, V.R. Hachaturov, V.A. Vasilyev

Accuracies of joint measuring of integral electron concentration parameter and frequency, and also joint measuring of time delay, integral electron concentration parameter and frequency in the case of reception of wideband signal with arbitrary duration taking into account a priori information about ionosphere electron concentration were considered. Results of analysis of a priori data and signal parameter influence on estimation accuracies were presented.

Keywords: parameters, ionosphere, electron concentration, measurement, correction, accuracy matrix, adaptation.