Материалы VII Международной научно-технической конференции, 7 – 11 декабря 2009 г.

МОСКВА **INTERMATIC – 2 0 0 9, часть 4** **МИРЭА**

ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2009 г. Е.П. СТРОГАНОВА

Московский технический университет связи и информатики

К современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) различного назначения предъявляются высокие требования по качеству функционирования. Выполнение этих требований невозможно без обеспечения достоверности измерений и оценки параметров и характеристик РЭА. Однако принять уверенное решение, какие результаты измерений можно называть достоверными, не так просто. При этом РЭА имеет весьма большой уровень изменчивости параметров и характеристик: В условиях эксплуатации на РЭА воздействует множество изменяющихся внешних факторов, в том числе, радиопомех, а элементы самой аппаратуры неидеальны, подвержены старению или могут выходить из строя. В то же время пользователю очень важно знать, можно ли верить результатам измерений.

Для решения проблемы точности и достоверности измерений актуальным является анализ источников снижения достоверности измерений параметров и характеристик РЭА, а также поиск путей повышения достоверности. При этом потенциальные источники нарушения достоверности можно разделить на источники, возникающие за счет подмены моделей измеряемых параметров и неидеальности применяемой аппаратуры, и на источники, связанные с неадекватным моделированием условий измерений и помеховой обстановки, в которой работает аппаратура в процессе эксплуатации. Неучет внутренних факторов приводит к тому, что точностные характеристики не соответствуют ожидаемым. А неадакватный учет внешних факторов, например, помеховой обстановки, может привести к проектированию неэффективных устройств, уменьшению точности, а также полному нарушению работы аппаратуры, например, к срыву слежения в системах синхронизации. Также требуют анализа как позитивные, так и негативные аспекты совместной работы различной РЭА.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния воздействующих факторов на достоверность измерений и оценку параметров и характеристик РЭА в условиях эксплуатации.

Обобщенной измерительной задачей будем полагать измерение характеристик РЭА в совокупности взаимодействующих объекта с учетом его состояния и средств измерений в поле внешних факторов – условий внешней среды, помех и сигналов другой РЭА при принципиальной совместной работе нескольких устройств. По результатам измерений проводится оценка характеристик, причем свойством оценки являются точность и достоверность. Достоверность можно определить как качество операции оценки, выражающееся в достигаемости цели измерительной задачи.

В теории измерений достоверность измерений определяется как степень доверия к результатам измерений и характеризуется вероятностью нахождения величины в некотором интервале [1]. При этом предполагается, что для измеряемой величины известен закон распределения, так что к ней можно применить положения теории вероятности и математической статистики. Достоверность здесь опирается на такой точностной показатель измерений как погрешность, которая, в свою очередь, зависит от погрешности используемых средств измерений. Но показания высокоточного радиоизмерительного прибора, например, в условиях помех могут оказаться недостоверными.

Введение такой точностной характеристики измерений как неопределенность [2] должно было интегрировать показатели точности и достоверности путем принятия во внимание всех факторов, влияющих на результат измерения. Неопределенность измерения характеризует рассеяние значений и является следствием неполноты знания об измеряемой величине. Присущая результатам измерений неопределенность дает оценку точности. Однако нахождение числовых показателей неопределенности оказалось практически трудно реализуемо даже в условиях измерений, при которых применимы упомянутые выше вероятностные и статистические методы. Для РЭА эта задача в ряде случаев неразрешима полностью даже при наличии достаточно большой выборки проведенных в одинаковых условиях результатов измерения, которая описывается известным законом распределения вероятности, из-за невозможности определить функции влияния факторов на измеряемый параметр.

В условиях эксплуатации РЭА численное значение неопределенности в ряде случаев определить весьма трудно. В этом случае в дополнении к количественной шкале неопределенности предложено применять качественную шкалу достоверности оценки результата измерений [3]. При этом достоверность будем понимать как соответствие цели измерений, определяемой первичной задачей измерений. Например, при трехуровневой шкале достоверности, низкая достоверность очевидна для результата единичного измерения, умеренная достоверность – для результатов по меньшей мере нескольких независимых измерений, высокая достоверность – для результатов нескольких независимых измерений в контролируемых условиях. Исследователем должно быть четко определено отношение к результатам с низкой достоверностью: эти результаты могут исключаться или не исключаться из дальнейшего применения, однако, степень достоверности должна всегда указываться. Результаты измерения с низкой достоверностью могут быть последовательными этапами в формировании массива данных для получения результатов с большей степенью достоверности.

При переходе на цифровые методы измерения может возникнуть подмена объекта измерений по сравнению с теоретическим определением этого объекта. Проведен анализ влияния такой подмены объекта измерений цифровой моделью на достоверность измерений. Типовые модели частоты и фазы, применяемые при цифровых методах измерения, основаны на подсчете числа пересечений порогового уровня.

Для смеси гармонического сигнала с частотой ω, амплитудой A и гауссовой помехи с дисперсией σ^2 и коэффициентом корреляции R (τ) эта средняя частота пересечений равна [4]

$$\omega_n = \omega_1 \left[e^{-\varepsilon} I_o(\gamma) + \frac{B}{2\varepsilon} I_e\left(\frac{\gamma}{\varepsilon}, \varepsilon\right) \right] , \quad (1)$$

где $\Delta\omega_n = [-R''(0)]^{1/2}$ - среднеквадратическая ширина спектра помехи; $I_o(x)$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, $I_e(k,x) = \int_o^x e^{-u} I_o(k,u)\,du$ - табулированная функция, $\varepsilon = (s^2 + B^2) / 4$, $s = A / \sigma$ $B = s\,\omega / \omega_1$, $\gamma = (s^2 - B^2) / 4$.

Распределение количества нулей за известный интервал времени в цифровой модели частоты становится несимметричным, причем степень несимметрии увеличивается с увеличением относительной ширины спектра помехи и уменьшением отношения сигнал/помеха.

На Рис. 1 приведены зависимости относительного смещения средней частоты в цифровом частотомере за счет появления «лишних» пересечений порогового уровня при наличии помехи $\delta\omega = (\omega_n - \omega)/\omega$ для случая помехи с коэффициентом корреляции $R(\tau) = \exp(-\beta\,\tau^2)\cos\omega\,\tau$. Кривые построены в функции отношения сигнал/помеха s

для нескольких значений отношения эффективной ширины полосы помехи $\Delta\omega_э$ к средней частоте сигнала $k = \Delta\omega_э / \omega = \beta / \omega \sqrt{\pi}/2$.

То есть использование цифровой модели частоты в цифровом частотомере при наличии помехи приводит к смещению оценки частоты, которое может достигать значительной величины. Попыткой устранить этот недостаток стало предложение измерять частоту с помощью подсчета за известный интервал времени числа максимумов положительной производной отрезков, соединяющих соседние отсчеты в цифровой модели. Однако, в этом методе при наличии помех вместо отрезков с положительной производной, соединяющих соседние отсчеты в цифровой модели, могут появляться отрезки с отрицательной производной.

В цифровом фазометре фиксируется интервал до первого нуля смеси сигнала и помехи, следующего после опорного нуля. То есть для принятой цифровой модели фазы следует рассчитывать плотность вероятностей временного интервала до первого нуля W(φ):

$$W_1(\varphi) = \frac{\left(1+k^2\right)^{1/2}}{2\pi}\left(exp\left\{ -\frac{s^2}{2}\left[\frac{cos^2(\varphi-\varphi_c)}{1+k^2} + sin^2(\varphi-\varphi_c) \right] \right\} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{2\pi}{1+k^2}\right)^{1/2} s\,cos(\varphi-\varphi_c)\, F\left[\frac{s\,cos(\varphi-\varphi_c)}{\left(1+k^2\right)^{1/2}} \right] exp\left[-\frac{s^2 \, sin^2(\varphi-\varphi_c)}{2} \right] \right), \qquad (2)$$

где φ_c - фаза сигнала, $k = \Delta\omega_п / \omega$, $\Delta\omega_п = [-R_0''(0)]^{1/2}$, $R_0(\tau)$ - огибающая коэффициента корреляции помехи $R(\tau) = R_0(\tau) \cos \omega_0 \tau$, F - функция Лапласа. На Рис. 2 показано, что функция $W(\varphi)$ несимметрична, причем степень несимметрии увеличивается с увеличением относительной ширины спектра помехи и уменьшением отношения сигнал/помеха, что приводит к смещению оценки фазы.

Таким образом, при наличии помех применение цифровых моделей приводит к ассиметрии распределения и смещению оценок частоты и фазы. Это снижает достоверность измерений цифровыми методами [5].

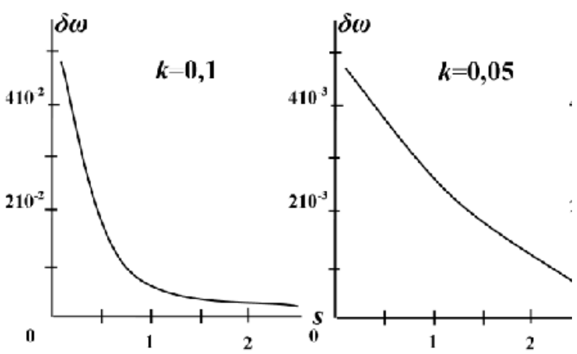


Рис. 1. Смещение оценки частоты в цифровом частотомере.

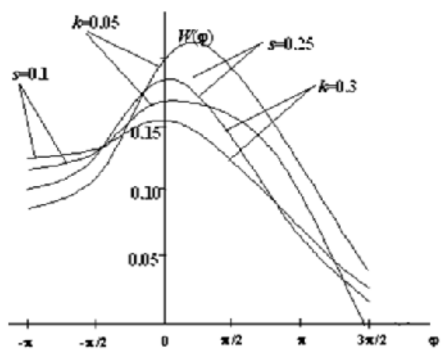


Рис. 2. Вид распределения плотности вероятности цифровой модели фазы.

Проведен анализ особенностей оценки точностных характеристик радиоизмерительных приборов, устанавливаемых на подвижном объекте. Здесь результат измерения находят с учетом динамического вектора состояния, включающего флуктуационную составляющую. В этом случае возникают специфические ошибки, связанные с приемопередачей измерительной информации по дискретному каналу в динамическом режиме. Однако, передача измерительной информации с подвижного объекта (ПО) может осуществляться в комплексированной системе, в которой наряду с измерительным каналом связного приемника присутствует канал спутниковой радионавигационной системы, что может способствовать улучшению характеристик измеряемого параметра.

Проведено исследование помехоустойчивости канала связи с подвижным объектом при обработке сигнала в связном приемнике с учетом навигационной информации. В этом случае возможна совместная обработка функционально связанных параметров связного и навигационного сигналов. Уравнения наблюдения на связном входе в случае фазоманипулированного сигнала и навигационном входе приемника, соответственно, имеют вид:

$$\xi_1(t) = S_1(t, \lambda, \theta) + n_1(t) = A_0\, g\,(t - \tau)\, \theta\,(t - \tau)\, cos\,(\omega_o t + \varphi) \qquad (3)$$

$$\xi_2(\mathrm{t}) = \mathrm{S}_2(\mathrm{t}, \lambda, \theta) + \mathrm{u}(\mathrm{t})\ . \qquad (4)$$

Для связного сигнала $S_1(t, \lambda, \theta)$: A_0 - амплитуда, $g\,(t - \tau)$ и $\theta\,(t - \tau)$ - символы модуляции сигнала псевдослучайной последовательностью и данными, а вектор непрерывных параметров λ включает в себя случайные фазу φ, задержку τ, ω_o - несущую частоту сигнала, и доплеровскую частоту ω сигнала. Навигационный сигнал $S_2(t, \lambda, \theta)$, содержит укороченный вектор непрерывных параметров:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \tau \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D/c \\ v_p \omega_o / c \end{bmatrix}, \qquad (5)$$

где D - расстояние между приемным и передающим устройствами, v_p - радиальная скорость объекта, c - скорость распространения радиоволн.

В предположении, что шум наблюдения в связном канале $n_1(t)$ белый гауссовый с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью $N_1/2$, шум наблюдения в навигационном канале $u(t)$ – окрашенный, а. процессы $\lambda(t)$ и $u(t)$ - марковские, то можно синтезировать квазиоптимальные алгоритмы комплексной обработки дискретно-непрерывной информации системы с использованием теории оптимальной нелинейной фильтрации. При гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятностей вектора λ приближенное уравнение для вычисления вектора имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\tau} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega^* \\ -\dfrac{\omega^*}{\omega_o} + N_\tau F_{2\tau} \\ -\alpha_1 \omega^* + N_\omega F_{2\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{1\varphi} \cdot thz \\ F_{1\tau} \cdot thz + 2\alpha_2 F_{2\tau} \\ F_{2\tau} \dfrac{2}{\omega_o} + 2(\alpha_3 - \alpha_1) F_{2\omega} \end{bmatrix},$$

$$F_{1\varphi} = -\frac{2A_o}{N_1} \xi_1 g(t - \tau^*) \sin\,(\omega_o t + \varphi^*)\,,$$

$$F_{1\tau} = \frac{2A_o}{N_1} \xi_1 \frac{d\, g(t - \tau^*)}{d\tau} \cos\,(\omega_o t + \varphi^*)\,, \qquad (6)$$

$$F_{2\tau} = \frac{1}{N_\tau + N_2} \left[\dot{\xi}_\tau + \frac{\omega^*}{\omega_o} + \alpha_2\,(\xi_\tau - \tau^*) \right],$$

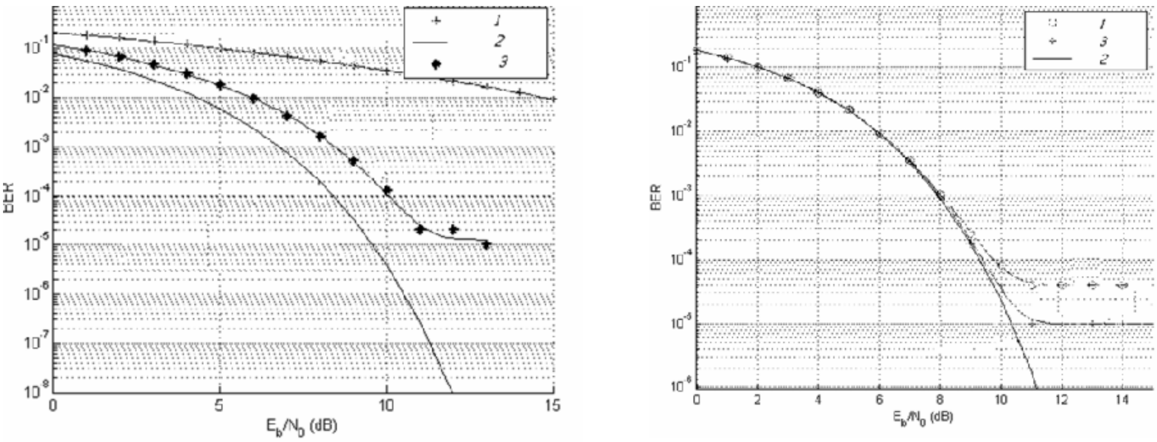
$$F_{2\omega} = \frac{1}{N_\omega + N_3} \left[\dot{\xi}_\omega + \alpha_1 \omega^* + \alpha_3\,(\xi_\omega - \omega^*) \right],$$

$$z = \int_{t_k + \tau^*}^{t_{k+1} + \tau^*} \xi_1\, g(t - \tau^*) \cos\,(\omega_o t + \varphi^*) dt\,,$$

α_i и N_i - соответствующие коэффициенты сноса и спектральные плотности, знаком ***** обозначены оценки соответствующих величин. Оценка дискретного информационного параметра θ на k-ом тактовом интервале с длительностью T_0 производится в соответствии с алгоритмом: $z \gtrless 0$.

Был проведен сравнительный анализ комплексированного от некомплексированного алгоритмов оценки дискретного информационного параметра θ путем иммитационного моделирования на ЭВМ [6]. На Рис. 3 приведены зависимости вероятности ошибочного приема параметра θ, которая определялась как зависимость относительной частоты несовпадений оценочных значений θ* с истинными значениями от отношения сигнал/шум на нормированном тактовом интервале $q = E_0 / N_1$, ($E_0 = A_0 T_0$) для модуляции ФМ-2 и ОФМ-2.

В комплексированной системе существенно улучшается помехоустойчивость. При использовании модуляции ОФМ-2 помехоустойчивость системы с комлексированием приближается к теоретической кривой. При использовании модуляции ФМ-2 возникают большие ошибки из-за перескоков фазы под влиянием помехи.



а) б)

Рис. 3 Зависимости помехоустойчивости информационного параметра (доплеровского сдвига) от отношения сигнал/шум в комплексированной и некомплексированной системах при модуляции ФМ-2 (а) и ОФМ-2 (б), 1 -без комплексирования, 2 – теоретический расчет, 3–с комплексированием.

Рассмотрена точность измерения дальности радиодальномером, размещенном на ПО, при воздействия помех. При проектировании радиодальномера на основе теории оптимальной фильтрации оптимальные оценки параметров получаются при задании априорных сведений о конкретном виде и уровнях сигнала, помехи, а также диапазоне значений параметров фильтра. Однако, реализуемый фильтр имеет параметры, отклоняющиеся от полученных при проектировании за счет допусков на элементы, старения и т.п. Построенный по оптимальному алгоритму радиодальномер, обеспечивающий в отсутствии отклонения параметров устройства от номинальных значений наилучшие точностные характеристики, не гарантируют их сохранения при появлении таких отклонений в процессе эксплуатации. Уравнение наблюдения для радиодальномера $Z(t) = h\ D(t) + n(t)$, где коэффициент $h = 1 + \Delta_c$ определяется систематической погрешностью Δ_c в измерении дальности, обусловленной отклонением параметров дальномера от номинальных значений, $n(t)$ – случайная погрешность измерения, обусловленная действием помех и моделируемая гауссовским шумом со спектральной плотностью мощности n. Рассчитано отклонение предполагаемой систематической ошибки дальномера h_2 относительно ее фактического значения h_1, обусловленного отклонением параметров дальномера от номинальных значений, и отклонением предполагаемого уровня помех N_2 от фактического N_1, в зависимости от времени наблюдения. На Рис. 4 приведены графики зависимости нормированной дисперсии ошибки оценивания дальности $\vartheta_{\tilde{D}}(t)/\vartheta_{D_{cm}}(t)$ ($\alpha = 2h\sqrt{N_\omega/N}$, $\vartheta_{D\,cm} = \sqrt{N N_0}/h$ - стационарное значение дисперсии ошибки фильтрации) от времени наблюдения αt, отклонения параметров от номинальных значений и уровня помех. Видно, что при построении оптимального фильтра радиодальномера с учетом неидеальности его элементов возникает нелинейно нарастающая динамическая погрешность.

Проведен анализ неопределенности и оценка достоверности фазовых измерений. Проведен анализ измерения фазы в условиях радиоканала с сильно флуктуирующими параметрами, которые возникают в условиях сильных геомагнитных возмущений, ионосферном распространении сигнала, турбулентности, а также в условиях сильных радиопомех. Распространение сигнала в таком канале приводит к случайным отклонениям временной задержки радиосигнала, превышающих его период, и, соответственно, отклонений фазы, превышающих π, то есть«перескоки» фазы в соседние циклы. При этом процесс становится некогерентным и использование техники фазовых измерений затруднено. Ограничение на рабочую частоту сигнала, обеспечивающее выполнение условия когерентности при фазовых измерениях:

$$f_{o\ доп.} \leq c/6\sigma_{\mu}\sqrt{LR}. \qquad (7)$$

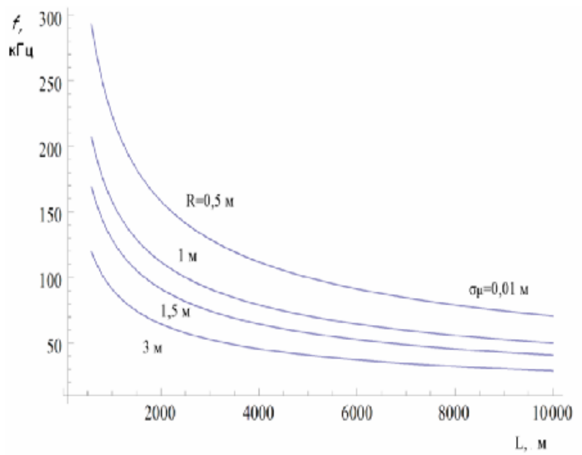


Рис. 5. Зависимость предельной частоты, при которой сохраняется когерентность при фазовых измерениях, от длины радиоканала.

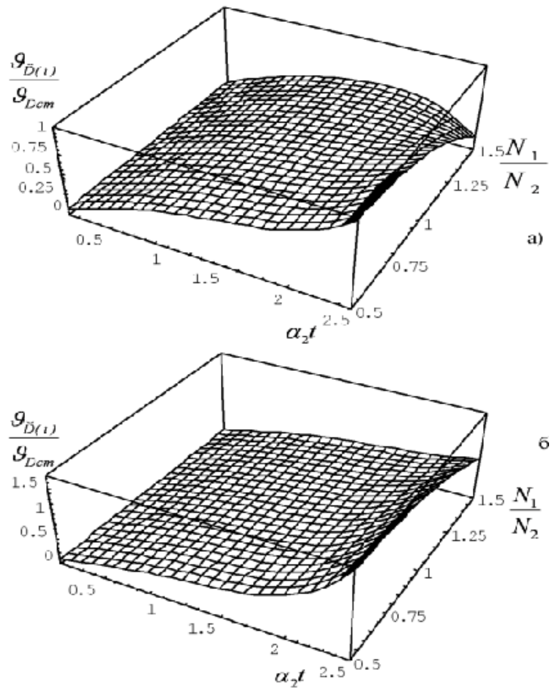


Рис. 4. Зависимость дисперсии ошибки оценивания дальности от времени наблюдения и уровня шумов.

На Рис. 5 показана зависимость предельной частоты, при которой сохраняется когерентность при фазовых измерениях, от длины радиоканала. Понижая рабочую частоту путем переходя к измерениям на разностной частоте можно улучшить разрешение многозначности фазы.

Таким образом, в результате проведенных исследований оценено влияние на достоверность оценки характеристик РЭА различных факторов. Предложено достоверность оценки характеристик в условиях эксплуатации измерять в качественных шкалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи: Учебное пособие для вузов. / Хромой Е.П., Кандинов А.В, Сенявский А.Л. и др. Под ред. *Хромого Б.П.* - М.: Радио и связь, 1986, - 424 с.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. - Switzerland: ISO Geneve. – 1993, - 101 p.
3. *Строганова Е.П.* Анализ неопределенности и оценка достоверности при измерениях параметров электромагнитных излучений радиоэлектронной аппаратуры. // Нелинейный мир. - 2009, т.7, № 8,. с. 622 – 624.
4. Rice S.O. Statistical properties of a sine wave plus random noise. BSTJ, 1948, v. 27, № 1, p. 109-157.
5. *Строганова Е.П.* Достоверность измерений при подмене объекта измерений цифровой моделью. // Информационно-измерительные системы и устройства. – 2009, т.7, № 8, С. 42 – 44.
6. *Строганова Е.П.* Улучшение помехоустойчивости канала связи с подвижным объектом путем совместной обработки связной и навигационной информации. // Успехи современной радиоэлектроники. - 2009, № 8, с. 52 – 54.