Мальцев Александр Дмитриевич,
преподаватель ВАС

Одоевский Сергей Михайлович,
профессор ВАС

Оценка помехозащищённости абонентских устройств спутниковых радионавигационных систем

Своевременное выявление помех спутниковым радионавигационным системам является одной из важных мер по обеспечению надежности навигационного обеспечения потребителей.

Известны основные источники помех: средства УКВ радиосвязи, система ДМЕ, первичные и вторичные радиолокационные станции управления воздушным движением, радиолокационные ответчики, телевизионные передатчики, средства подвижной спутниковой связи. Экспериментально подтверждено влияние излучений перечисленных средств на входные тракты навигационных приемников. Отметим также, что помимо возможности создания помех в диапазоне сигналов самих спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС или GPS нельзя исключать появления помех при передаче поправок в спутниковых системах посадки типа LAAS в диапазоне 112... 117,95 МГц.

В качестве одного из признаков для обнаружения помехи естественно используется отношение сигнал/шум на входе приемника. При этом требуется разработка рациональных алгоритмов для принятия решения об обнаружении сигналов помех. Также потенциально для этого могут использоваться факты потери слежения за кодом или несущей частотой сигнала, изменения определяемых навигационных параметров, геометрических факторов, сигналов контроля целостности, а также некоторых составных показателей качества.

Критерии обнаружения для различных спутниковых приемников (одночастотных и двухчастотных) могут быть различными.

Отметим также, что помимо возможности создания помех в диапазоне сигналов самих спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС или GPS нельзя исключать появления помех при передаче поправок в спутниковых системах посадки типа LAAS в диапазоне 112... 117,95 МГц.

Таким образом, актуальна проблема количественной оценки помехозащищенности абонентских навигационных устройств.

Одним из показателей помехозащищенности является вероятность подавления абонентского устройства $P_{под}$ или вероятность его нормального функционирования в условиях преднамеренных помех, $P_{нор} = 1 - P_{под}$.

Для оценки воспользуемся методикой, используемой для оценки ЭМС или помехозащищенности средств связи. Вероятность $P_{нор}$ есть вероятность того, что отношение мощности сигнала $P_с$ к суммарной мощности помехи $P_{пом\Sigma}$ на входе приемника абонентского устройства будет больше заданной величины q^*, обеспечивающей требуемое качество

определения местоположения объекта:

$$P_{нор} = p\left[\frac{P_c}{P_{пом\Sigma}} \geq q^*\right], \quad (1)$$

или

$$P_{нор} = p\left[\left(P_{c[дБВт]} - P_{пом\Sigma[дБВт]}\right) \geq q^*_{[дБВт]}\right]. \quad (2)$$

Для определения величины $P_{нор}$ необходимо знать величину q^*, мощность сигнала и суммарной помехи на входе приемника

$$P_{n\Sigma} = 10\lg\left(P_ш + 10^{0,1P_{пом}}\right). \quad (3)$$

Обе величины ($P_с$ и $P_{пом}$) определяются уравнением передачи:

$$P_{пом} = P_{изл.п} + G_п(\varphi) - W_{\Sigma п} - L_{пол} - Q; \quad (4)$$

$$P_c = P_{изл.с} + G_{пер.с} + G_{прм.с} - W_{\Sigma c}\,. \quad (5)$$

Здесь все величины выражены в дБ:

$P_{изл.п}$ – мощность излучения передатчика помех с учетом потерь в фидере;

$P_{изл.с}$ – мощность излучения навигационного передатчика;

$G_п(\varphi)$ - коэффициент усиления антенны передатчика помех;

$W_{пол}$ – поляризационные потери, учитывающие несовпадение поляризаций антенны передатчика помех и приемника абонентского устройства;

Q – выигрыш, обеспечиваемый реализованным методом помехозащищенности по отношению к радиоприемному устройству без специальных мер помехозащищенности;

$G_{пер.с}$ – коэффициент усиления антенны навигационного передатчика;

$G_{прм.}c$ – коэффициент усиления антенны приемника абонентского устройства;

$W_{\Sigma П}, W_{\Sigma C}$ - суммарные затухания сигнала и помехи на трассе распространения.

В неравенствах 1 и 2 $P_с$ и $P_{П\Sigma}$, в общем случае, являются случайными величинами с логарифмически нормальным распределением. Случайность $P_{П\Sigma}$ обусловлена флуктуациями коэффициента усиления антенны вокруг среднего значения в зависимости от направления прихода помехи, а следовательно, флуктуациями уровня мощности помехи, соотношением мощности собственных шумов приемника и мощности помехи на входе демодулятора.

Собственные шумы приемника и помеха являются гауссовскими шумами, первые с постоянным средним значением, вторые со случайным средним значением, подчиняющимся логарифмическому нормальному закону.

Известно, что линейное преобразование случайной величины не меняет закона распределения. Поэтому величина

$$P_{П\Sigma[дБВт]} = 10\lg\left(P_{П[Вт]} + P_{Ш[Вт]}\right) \quad (6)$$

распределена как и $P_{п[дБВт]}$ по нормальному закону, а $P_{п[Вт]}$ – по логарифмическому нормальному закону.

Так как случайные величины $P_{с.вх}$ и $P_{П\Sigma}$ в логарифмическом масштабе распределены нормально, то и разность их также распределена нормально

$$\sigma_\Sigma = \sigma_с\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{П\Sigma}}{\sigma_с}\right)^2 - 2\rho_{СП\Sigma}\left(\frac{\sigma_{П\Sigma}}{\sigma_с}\right)},$$

где $\rho_{СП\Sigma}$ - коэффициент корреляции.

Если помеха и сигнал не коррелированны, то $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{П\Sigma}^2 + \sigma_C^2}$, а при детерминированном сигнале $\sigma_{\Sigma} = \sigma_{П\Sigma}$.

При условии прихода помехи в секторе $\Delta\varphi_i$, вероятность нормального функционирования приемника абонентского устройства:

$$P_{нор/\Delta\varphi_i} = \begin{cases} 0.5 + \phi_0(x) \\ 0.5 - \phi_0(x) \end{cases} \text{при} \begin{matrix} x \geq 0, \\ x < 0 \end{matrix} \tag{7}$$

где $$x = \frac{P_c - P_{П\Sigma} - q^*}{\sigma_{\Sigma}} \tag{8}$$

Полная вероятность

$$P_{нор} = P_{гл} \cdot P_{нор/гл.л} + \sum_{i=1}^{k} P_{\Delta\varphi_i} \cdot P_{нор/\Delta\varphi_i} \tag{9}$$

Суммарная мощность шума в приемнике определяется линейным преобразователем случайной величины $P_{п[Вт]}$. Проведя соответствующие преобразования случайной величины, распределенной по логарифмическому нормальному закону, получим:

$$\sigma_{П\Sigma} = M \sqrt{\ln\left\{ \frac{\exp\left(0.01\frac{\sigma_А^2}{M^2}\right) - 1}{\left[1 + \frac{P_ш}{P_п}\left(\exp\left(-0.01\frac{\sigma_А^2}{M^2}\right)\right)\right]^2} + 1 \right.} \tag{10}$$

Здесь М = 0,4343. В случае одновременного воздействия нескольких помех различных видов необходимо по формуле (6) рассчитать $P_{П\Sigma}$, добавляя для каждой помехи член, аналогичный второму члену, по формуле (10) - $\sigma_{П\Sigma}$, подставляя в нее вместо $\sigma_А$ $\sigma_{А\Sigma}$, определяем $y_А$ известными вероятностными методами, затем определяется $P_{нор}$.

При последовательном воздействии различных ***r*** помех в оцениваемый промежуток времени вероятность успешного функционирования приемника абонентского устройства

$$P_{НОР.\Sigma} = 1 - \sum_{i=1}^{r} p_{пj}(1 - p_{нор.i}) \quad , \tag{11}$$

где $p_{пi}$ - вероятность воздействия *i*-й помехи.

В выражениях (4) и (5) суммарные затухания равны

$$W_{\Sigma} = W_{св} + W_p \quad , \tag{12}$$

где $W_{св}$ – затухания сигнала в свободном пространстве;

$W_р$ – затухания сигнала, вносимое рельефом местности и местными предметами на трассах связи и помех.

Наиболее трудоемкая задача вычисление $W_р$. В общем случае $W_р$ является функцией нескольких параметров, поэтому при ее вычислении надо учитывать профиль рельефа местности, прежде всего, в направлении передатчика помех. Сложность здесь заключается в том, что при полете передатчика помех на летно-подъемном средстве направление на передатчик помех непрерывно меняется, а вместе с ним может существенно измениться и величина $W_р$. Эти изменения значительны, поэтому не учитывать их нельзя. При расчетах целесообразно весь сектор обзора разбить на K участков $\Delta\varphi_i$, для каждого участка найти е величину $W_{рi}$, а

затем определить минимальное значение $W_{\text{р i min}}$ в секторе приема и использовать его в дальнейших расчетах.

Возможны и другие решения. По вычисленным значениям $W_{\text{р i}}$ находим среднее значении этих величин:

$$W_{pcp} = \frac{1}{\kappa}\sum_{i=1}^{k} W_{pi}$$

Здесь $W_{\text{рср}}$ и $W_{\text{р}i}$ даны в разах и их используют в дальнейших расчетах.

Из вышеизложенного можем определить следующий порядок расчета помехозащищенности абонентского устройства:

1. Из характеристик радионавигационной системы находим мощность сигнала на входе приемника абонентского устройства для околоземного и пригоризонтного расположения передатчика навигационных сигналов. Если таких данных нет, то вычисляем значение $P_{\text{с}}$ по параметрам излучаемого передатчиком радиосигнала, предварительно рассчитав наклонную дальность, а затем величину $w_{C\Sigma}$.
2. По характеристикам передатчика помех и тактике применения передатчиков помех рассчитываем вначале величину $w_{\Sigma\text{П}}$, а затем $P_{\text{ном}}$.
3. По характеристикам приемника абонентского устройства находим q*. Необходимо помнить, что в выражение (8) надо подставлять значение сигнал/помеха, которое будет со знаком минус.
4. Вычисляем значение величины $\sigma_{\Pi\Sigma}$ по формуле (10). В этой формуле величины $P_{\text{ш}}$ и $P_{\text{п}}$ выражение в Вт, а $\sigma_{\text{А}}$ обычно принимают равным 1-4 дБ. Если $P_{\text{ш}} << P_{\text{п}}$, то можно применять $\sigma_{\Pi\Sigma} = \sigma_A = \sigma_\Sigma$.
5. Вычисляем величину x по формуле (8).
6. По таблицам, графикам находим или вычисляем значение $\phi_0(x)$.
7. Находим значение $P_{\text{нор}}/\Delta\varphi_i$ по формуле (7).
8. При необходимости вычисляем $P_{\text{нор}}$ и $P_{\text{НОР.}\Sigma}$ по формулам (9) и (11).

Предложенная методика может использоваться для количественной оценки воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех на абонентские устройства потребителей. При ее применении следует учитывать, что $P_{\text{ном}}$ рассчитывается в полосе принимаемого сигнала. Это значит, что при воздействии узкополосной помехи ее мощность нужно пересчитать.

Литература

1. Навигационное обеспечение подвижных абонентов систем мобильной связи на основе спутниковых радионавигационных систем.- Успехи современной радиоэлектроники, 2001, №9 - С.3 - 26 .
2. Ю. А. Соловьёв. Спутниковая навигация и её приложения.- М.: Эко-Трендз, 2003.- 326 с.

3. Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радиолокационные и радионавигационные системы: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 1994.- 296 с.
4. Карлащук В.И., Карлащук С.В. Спутниковая навигация. Методы и средства.- М.: СОЛОН-Пресс, 2006.-176 с.: ил. (Серия «Библиотека инженера»).
5. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС.- М: Горячая линия-Телеком, 2005.- 272 с.