

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА В СИСТЕМАХ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Работа систем радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы основана на явлении рассеяния электромагнитной волны на неоднородностях, создаваемых звуковой посылкой, распространяющейся в атмосфере. По характеристикам отраженного радиосигнала определяется скорость звука в среде, позволяющая вычислять далее значения температуры воздуха и скорости ветра [1].

В настоящее время в системах РАЗ реализованы алгоритмы обработки сигналов, заимствованные из радиолокации, которые основаны на выделении и измерении доплеровской частоты колебаний. Однако оценки скорости звука, получаемые в соответствии с используемыми в системах РАЗ алгоритмами, характеризуются наличием значительных по величине систематических погрешностей [1 – 3]. С целью повышения качества оценок параметров атмосферы предложено [4 – 6] осуществлять измерение с помощью корреляционного метода значение параметра расстройки условия Брэгга q , который является энергетическим параметром сигнала.

Цель работы – анализ потенциальной точности оценки параметра расстройки условия Брэгга.

В статье оценивается также потенциальная точность оценки параметров атмосферы корреляционным методом в системах РАЗ, рассмотрено влияние вида зондирующих сигналов на потенциальную точность оценки параметров атмосферы корреляционным методом.

1. Соотношения для расчета потенциальной точности измерения параметров сигнала

В системах РАЗ потенциальная точность измерения параметров атмосферы корреляционным способом определяется значением дисперсии D_E оценки значений параметра расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется отраженный радиосигнал. Для определения дисперсии оценки величины q в системах РАЗ можно воспользоваться формулой для нахождения дисперсии оценки энергетического параметра сигнала [7]

$$D(q_m|q_0) = D_E(q_0) = \left[\frac{\partial^2 \hat{S}(q_1, q_2)}{\partial q_1 \partial q_2} \right]_{q_0}^{-1}, \quad (1)$$

где q – параметр расстройки условия Брэгга, который является энергетическим параметром, поскольку его значение влияет на энергию принимаемого сигнала и определяет энергию опорных сигналов $F(r, q)$ в системе корреляционного оценивания [4-6]; $\hat{S}(q_1, q_2)$ – радиоакустическая ненормированная сигнальная функция. $\hat{S}(q_1, q_2)$ – представляет собой функцию взаимной корреляции входного полезного сигнала $F(r, q_1)$ и опорного сигнала $F(r, q_2)$ систем корреляционной обработки систем РАЗ. Указанные сигналы имеют различные значения параметров q_1 и q_2 .

Запишем выражение для радиоакустической ненормированной сигнальной функции. Поскольку при радиоакустическом зондировании входной полезный сигнал представляет

собой отраженный от акустической посылки радиосигнал, то опорный сигнал удобно описывать функцией рассеяния [2]. Тогда сигнальная функция будет иметь следующий вид:

$$\hat{S}(q_1, q_2) = \int_0^T F(r, q_1)F(r, q_2)dr, \quad (2)$$

где $F(r, q_1)$ – отраженный радиосигнал с некоторым значением информационного параметра q_1 , $F(r, q_2)$ – опорный сигнал с некоторым значением информационного параметра q_2 .

2. Зависимость потенциальной точности измерения параметров сигнала от вида зондирующих сигналов

Получим кривую зависимости $D_E(q_0)$ дисперсии оценки информационного параметра от значения самого параметра при условии использования простых зондирующих сигналов: электромагнитного $E(r)$ и акустического $S_1(r)$ с прямоугольными огибающими.

Для получения зависимости $D_E(q_0)$ определим вид радиоакустической ненормированной сигнальной функции $\hat{S}(q_1, q_2)$ (2) и численно определим значения смешанной производной $\hat{S}(q_0, q_0)$ (1) в точках $q_0 \in [-1, 1]$. Сигнальная функция $\hat{S}(q_1, q_2)$ имеет вид, показанный на рис. 1.

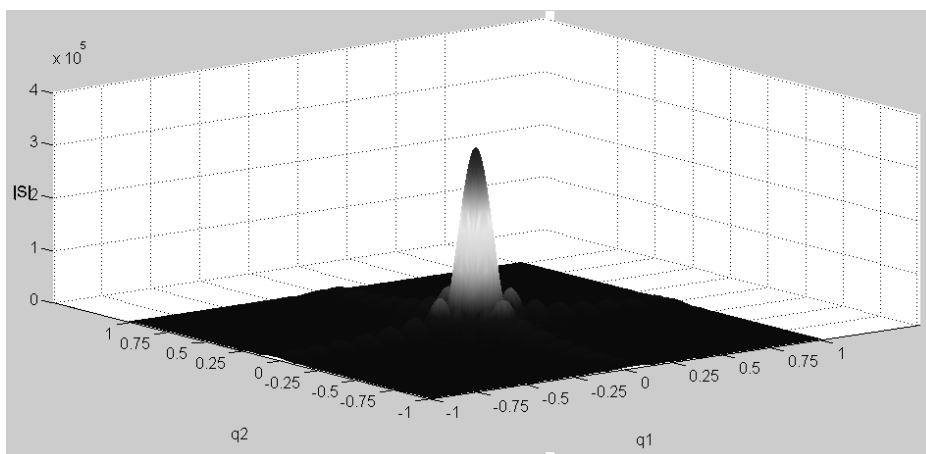


Рис. 1. Сигнальная функция $\hat{S}(q_0, q_0)$ при использовании простых радиосигнала $E(r)$ и акустического сигнала $S_1(r)$ с прямоугольными огибающими

Вид зависимости $D_E(q_0)$ при условии использования зондирующих сигналов $E(r)$, $S_1(r)$ с прямоугольными огибающими показан на рис. 2.

На рис. 3 – 6 показаны графики зависимостей $D_E(q_0)$ при использовании различных комбинаций зондирующих акустических и электромагнитных сигналов, в том числе сигналов с колоколообразными огибающими

$$E_2(r) = Ee^{-\frac{r^2}{2a^2}}, \quad S_4(r) = Se^{-\frac{r^2}{2a_1^2}}, \quad (3)$$

где параметры a и a_1 определяют длительности (пространственные протяженности) электромагнитного $\Delta E(r)$ и акустического $\Delta S(r)$ зондирующих сигналов.

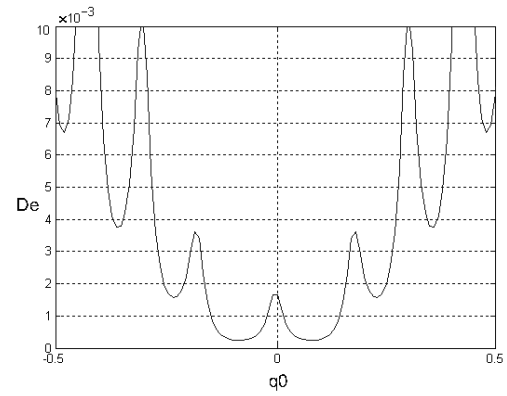
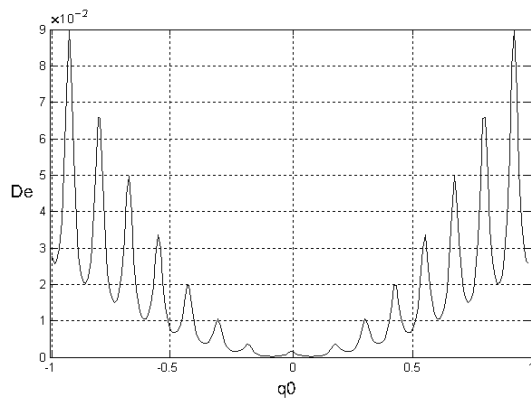


Рис. 2. Дисперсия $D_E(q_0)$ оценки энергетического параметра при использовании прямоугольных зондирующих сигналов $S_1(r)$ и $E(r)$

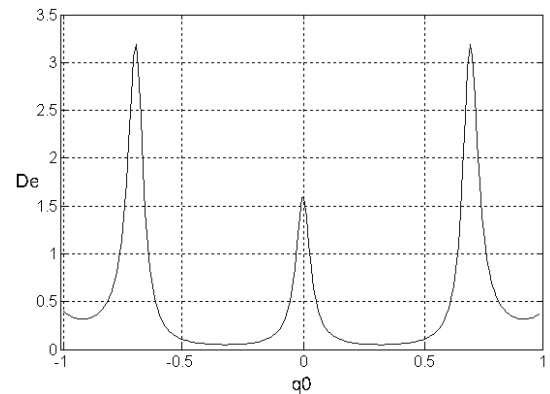
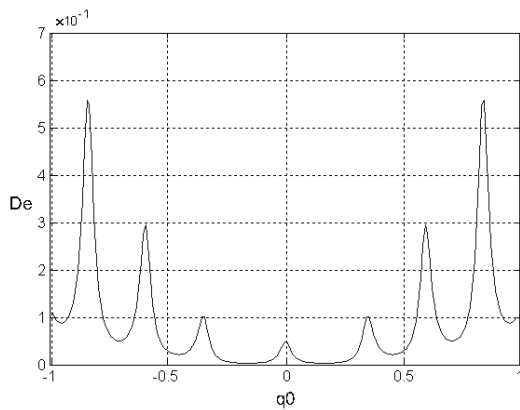


Рис. 3. Зависимость $D_E(q_0)$ при использовании сигналов $S_2(r)$ и $E(r)$ с прямоугольными огибающими ($\Delta S_2(r) < \Delta S_1(r)$)

Рис. 4. Зависимость $D_E(q_0)$ при использовании сигналов $S_3(r)$ и $E(r)$ с прямоугольными огибающими ($\Delta S_3(r) < \Delta S_2(r)$)

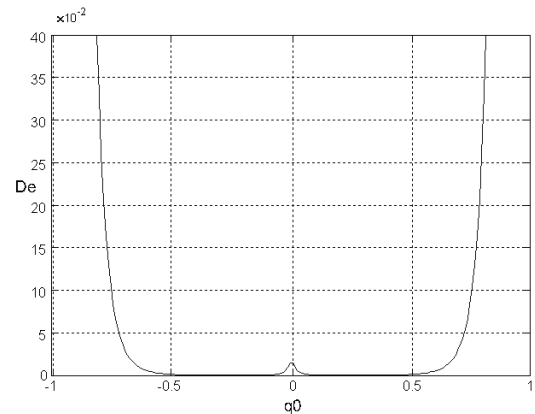
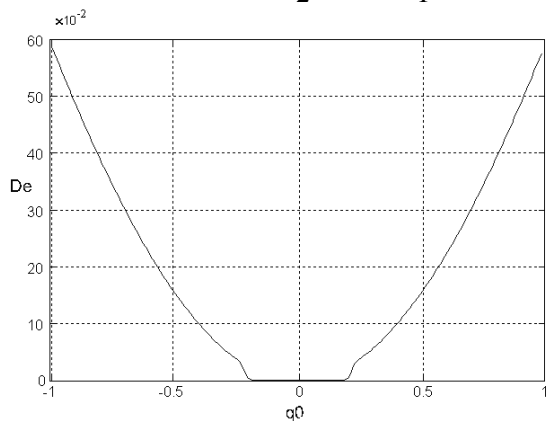


Рис. 5. Зависимость $D_E(q_0)$ при использовании сигналов с колоколообразными огибающими $E_2(r)$ и $S_4(r)$

Рис. 6. Зависимость $D_E(q_0)$ при использовании сигналов с колоколообразными огибающими $E(r)$ и $S_5(r)$ ($\Delta S_5(r) < \Delta S_4(r)$)

Зависимости $D_E(q_0)$, полученные для рассмотренных видов зондирующих сигналов, представляют собой кривые с многочисленными пиками или кривые с единственным пиком в точке $q_0 = 0$. При увеличении параметра расстройки условия Брэгга q_0 дисперсия D_E вначале уменьшается, а затем имеет тенденцию к росту.

Меньшие значения дисперсии D_E в районе значений $q_0 = 0$ обусловлены тем, что с увеличением параметра расстройки условия Брэгга в атмосфере наблюдается усложнение

структуры отраженного радиосигнала, имеет место угловая модуляция сигнала, т. е. отраженный сигнал становится сложным по структуре.

Увеличение дисперсии D_E после определенного значения q_0 связано с тем, что параметр расстройки условия Брэгга является энергетическим параметром. Из анализа, например рис. 4 и 7, видно, что увеличение дисперсии D_E начинается со значений параметра q_0 , при которых энергия опорного и отраженного сигналов становятся достаточно малыми. На рис. 3, 7 это значение составляет $q \approx 0.4$.

Таким образом, увеличение значения дисперсии D_E после некоторого значения параметра q_0 связано с тем, что энергия опорных и отраженных сигналов в этом случае становится достаточно малой, вследствие чего флуктуационная ошибка при использовании корреляционных интегралов отраженного сигнала и опорных сигналов становится значительной.

Из рис. 2 – 6 видно, что имеет место зависимость D_E от длительности акустического сигнала. С уменьшением длительности акустического сигнала при прочих равных условиях значение D_E возрастает, что означает ухудшение потенциальной точности. Такое поведение объясняется воздействием двух факторов. Во-первых, энергия отраженного сигнала $E^3(r) \leq \Delta S_1(r)$ с уменьшением длительности акустического сигнала уменьшается медленнее при больших значениях параметра расстройки условия Брэгга q_0 . Во-вторых, с уменьшением длительности акустического зондирующего сигнала имеет место тенденция упрощения структуры отраженных от него радиосигналов, причем упрощение структуры объясняется уменьшением количества уплотнений воздуха, создаваемых акустической посылкой, от которых соответственно происходит отражение.

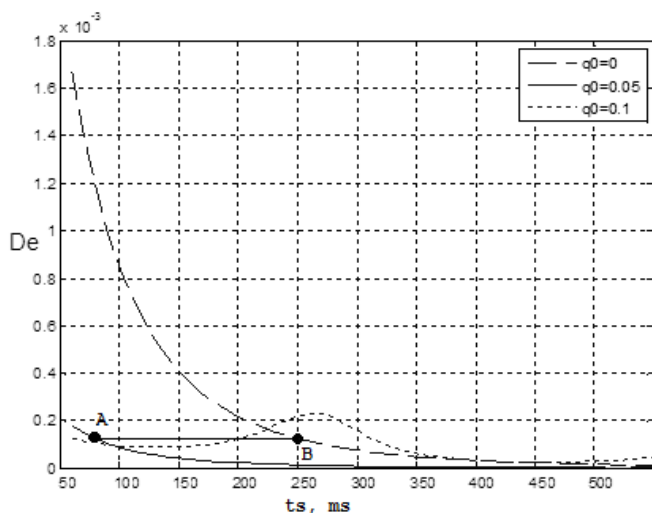


Рис. 8. Зависимость $D_E(t_s, q_0)$ при использовании зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими точность оценки значений параметров атмосферы может быть хуже для более длительных зондирующих акустических сигналов.

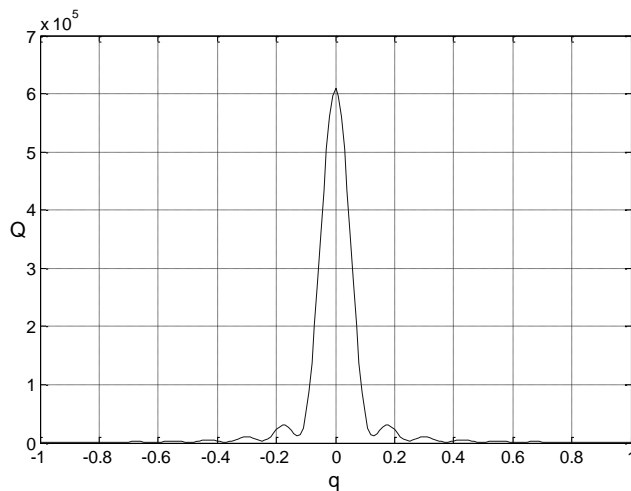


Рис. 7. Зависимость энергии отраженного сигнала от параметра расстройки условия Брэгга при использовании сигналов $S_3(r)$ и $E(r)$,

На рис. 8 показана зависимость дисперсии оценки D_E от длительности акустического зондирующего сигнала t_s при заданных значениях параметра расстройки условия Брэгга q_0 , в случае использования зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими.

Из рисунка видно, что в целом с увеличением длительности акустического зондирующего сигнала точность оценки значений параметров атмосферы повышается. Однако, как видно из рисунка, для кривой, построенной при $q_0 = 0.1$, возможна также ситуация, когда потенциальная

Согласно рис. 8 с увеличением значения параметра расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется отраженный радиосигнал, зависимость дисперсии D_E от длительности акустического зондирующего сигнала менее выражена. Это говорит о том, что при значениях q_0 , отличных от нуля, возможно использовать акустические сигналы меньшей длительности, не теряя при этом в точности оценок параметров атмосферы. В свою очередь, уменьшение длительности зондирующего акустического сигнала позволяет повысить разрешающую способность системы РАЗ по дальности.

Из рис. 8 также видно, что при увеличении значений параметра q_0 график зависимости $D_E(t_s, q_0)$ располагается ниже. Проведем некоторые рассуждения, чтобы пояснить наблюдающийся эффект. Предположим, что радиосигнал отражался от акустической посылки длительностью $t_s = 250$ мс при $q_0 = 0$. Тогда, согласно рис. 8, дисперсия оценки составляет $D_E \approx 0.15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$ (точка В). Если бы радиосигнал отражался от акустической посылки при $q_0 = 0.05$, то для обеспечения значения дисперсии $D_E \approx 0.15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$ было бы достаточно длительности акустической посылки $t_s \approx 70$ мс (рис. 8, точка А). Это позволяет утверждать, что с увеличением значения q_0 становится возможным уменьшение длительности зондирующего акустического сигнала без потери точности оценок параметров атмосферы.

3. Влияние энергетического характера параметра расстройки условия Брэгга на потенциальную точность оценки

Влияние энергетического характера параметра расстройки условия Брэгга на потенциальную точность оценки параметров атмосферы рассмотрим для случая использования зондирующих сигналов $E(r)$ и $S_1(r)$, имеющих прямоугольные огибающие.

Получим зависимость $D_E(q_0)$, используя радиоакустическую ненормированную сигнальную функцию $\hat{S}(q_1, q_2)$, описываемую выражением (2), где $F(r, q_1)$ и $F(r, q_2)$ – сигналы равной мощности при разных значениях параметров q_1, q_2 . Чтобы получить сигналы $F(r, q)$ равной мощности, необходимо использовать умножение на коэффициент k , где $k = \max(E(q_0))/E(q_0)$.

Зависимость $D_E(q_0)$ для зондирующих сигналов $S_1(r), E(r)$ при условии коррекции энергии входных и опорных сигналов представлена на рис. 9.

Как видно, зависимость $D_E(q_0)$ имеет максимум в точке $q_0 = 0$. При увеличении значений параметра q_0 наблюдаются равновеликие боковые лепестки, которые не превышают основной лепесток. Отсюда следует вывод, что поведение зависимости, когда с увеличением параметра расстройки условия Брэгга q_0 дисперсия D_E сначала уменьшается, а потом начинает возрастать, связано с тем, что параметр расстройки условия Брэгга q является энергетическим информационным параметром, оцениваемым в системах радиоакустического зондирования атмосферы.

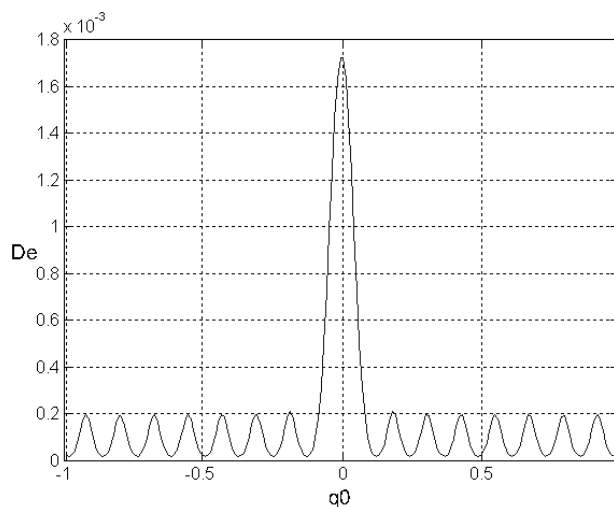


Рис. 9. Зависимость $D_E(q_0)$ при использовании зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими $S_1(r)$ и $E(r)$, где входные и опорные сигналы $F(r, q)$ имеют равную мощность

Заключение

В системах РАЗ для определения дисперсии оценки максимального правдоподобия информационного параметра следует пользоваться формулой (1). Информационный параметр – параметр расстройки условия Брэгга q – является энергетическим параметром, т.к. его значение определяет энергию принимаемого сигнала и энергию опорных сигналов.

Дисперсия D_E оценки значений параметров атмосферы зависит от значения параметра расстройки условия Брэгга q_0 , при котором формируется принимаемый радиосигнал.

Зависимость дисперсии от расстройки условия Брэгга при рассмотренных зондирующих сигналах представляет собой кривую с рядом пиков или кривую с единственным пиком в точке $q_0 = 0$. С увеличением расстройки условия Брэгга q_0 дисперсия D_E сначала уменьшается, а затем имеет тенденцию к росту.

Имеет место зависимость D_E от длительности акустического сигнала. С уменьшением длительности акустического сигнала значение D_E возрастает, что соответствует ухудшению потенциальной точности. В то же время возможна ситуация, когда потенциальная точность оценки значений параметров атмосферы может быть хуже при более длительных зондирующих акустических сигналах.

При увеличении значения параметра расстройки условия Брэгга q_0 , при которой формируется отраженный от акустической посылки радиосигнал, возможно повышение разрешающей способности системы РАЗ по дальности без потери в точности оценок значений параметров атмосферы.

Кривая зависимости $D_E(q_0)$ для зондирующих сигналов с прямоугольными огибающими при условии коррекции энергии входных и опорных сигналов имеет максимум, когда входной сигнал имеет значение параметра расстройки условия Брэгга $q_0 = 0$, а при увеличении значения q_0 дисперсия D_E уменьшается.

Список литературы: 1. *Каллистратова, М.А.* Радиоакустическое зондирование атмосферы / *М.А. Каллистратова, А.И. Кон.* – М. : Наука, 1985. – 200 с. 2. *Карташов, В.М.* Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы / *В.М. Карташов* // Радиотехника. – Харьков, 2001. – №118. – С. 61-65. 3. *Карташов В.М.* Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. – Харьков : ХНУРЭ, 2011. – 233 с. 4. *Карташов, В.М., Куля, Д.Н., Пащенко, С.В.* Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков. – 2012. – № 4/9(58). – С. 57-61. 5. *Карташов, В.М., Куля, Д.Н.* Синтез и анализ дискриминатора слеящего устройства систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. – 2012. – №171. – С. 234-239. 6. *Карташов, В.М., Куля, Д.Н., Кушнир, М.В.* Анализ и синтез алгоритмов обработки сигналов в системах радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Муром, Россия. – 2013. – №4(12). – С.63-68. 7. *Куликов, Е.И.* Оценка параметров сигналов на фоне помех / *Е.И. Куликов, А.П. Трифонов.* – М. : Сов. радио, 1978. – 296 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.06.2015