

Определение разности задержек сигнала на различных частотах для оценки полного электронного содержания ионосферы при наблюдении за сложным объектом

А.К. Строев

Открытое акционерное общество «Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца»

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В настоящее время одной из актуальных задач радиолокации является повышение разрешающей способности сигнала для построения изображений и распознавания наблюдаемых объектов. Для получения высокого разрешения по дальности необходимо использование сверхширокополосных сигналов. Как показано в [1], такие сигналы существенно искажаются при прохождении через ионосферу, что может сделать невозможным их согласованную обработку. Однако влияние ионосферы может быть скомпенсировано, если известно полное электронное содержание (total electron content, ТЕС) вдоль пути распространения сигнала.

В работе [2] предложен двухполосный метод, позволяющий оценивать ТЕС непосредственно по принятому сигналу. При этом был выдвинут ряд предположений, в частности, наблюдаемый объект предполагался точечным. В настоящей работе проведено исследование двухполосного метода при наблюдении сложного объекта, содержащего несколько блестящих точек.

Двухполосный метод заключается в следующем. Пусть излученный сигнал представлен в спектральном виде:

$$s_0(t) = A_0 e^{-i\omega_0 t} \int s(\Omega) e^{-i\Omega t} d\Omega, \quad (1)$$

где ω_0 – несущая частота, A_0 – амплитуда сигнала, $s(\Omega)$ – спектр огибающей сигнала. Тогда принимаемый сигнал:

$$s_1(t) = A_1 e^{-i\omega_0 \left(t - \frac{2R}{c}\right)} \int s(\Omega) e^{-i\Omega \left(t - \frac{2R}{c}\right)} e^{i\varphi(\omega_0 + \Omega)} d\Omega, \quad (2)$$

где A_1 – амплитуда принимаемого сигнала, R – расстояние до наблюдаемого объекта, $\varphi(\Omega)$ – дополнительная фазовая задержка, вызываемая ионосферой. Результат согласованной фильтрации без учета влияния ионосферы:

$$s_2(t) = A_2 \int |s(\Omega)| e^{-i\Omega \left(t - \frac{2R}{c}\right)} e^{i\varphi(\omega_0 + \Omega)} d\Omega \quad (3)$$

Величина вносимой ионосферой фазовой задержки дается формулой [3]:

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega}{c} L(\omega), \quad (4)$$

где $L(\omega)$ – дополнительный фазовый путь, вызываемый ионосферой, который может быть вычислен по формуле:

$$L(F) = -\frac{K}{F^2} \cdot \text{ТЕС}, \quad (5)$$

где $F = \omega / 2\pi$ – частота в МГц, $\text{ТЕС} = \int_0^R N(\mathbf{1}\sigma) d\sigma$ – полная электронная концентрация в м^{-2} , и $K = 40.3 \cdot 10^{-12} \text{ МГц}^2 \cdot \text{м}^3$, так что результат измеряется в метрах. Из (4) и (5) следует, что ионосферная фазовая поправка обратно пропорциональна частоте. Представим ее в виде суммы трех слагаемых:

$$\varphi(\omega_0 + \Omega) = \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0) - \frac{\Omega}{c} L(\omega_0) + \frac{\Omega^2}{\omega_0(\omega_0 + \Omega)} \frac{\omega_0}{c} L(\omega_0) \quad (6)$$

Здесь первое слагаемое представляет собой постоянную поправку к фазе, второе – дополнительную групповую задержку, а третье описывает искажение формы импульса. Таким образом, суммарная групповая задержка будет равна:

$$\tau = \frac{2R}{c} - \frac{2L(\omega_0)}{c} \quad (7)$$

В двухполосном методе принимаемый сигнал обрабатывается при помощи двух полосовых фильтров с центральными частотами f_1 и f_2 . Из-за влияния ионосферы задержка отклика этих фильтров будет различна:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2R}{c} - \frac{2L(\omega_1)}{c} \\ \tau_2 &= \frac{2R}{c} - \frac{2L(\omega_2)}{c} \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя (5) в (8) и решая систему уравнений, получаем выражение для оценки ТЕС на основе разности задержек:

$$\text{ТЕС} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{2K \cdot \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right)} \quad (9)$$

Как правило, в радиолокации для измерения задержки (в данном случае разности задержек двух фильтров) применяется корреляционный метод [4], заключающийся в следующем. Пусть нужно измерить задержку между сигналами $f(t)$ и $g(t) = f(t - \tau)$. Для этого вычислим выражение $\int f(t - \tilde{\tau})g(t)dt$ для различных предполагаемых задержек $\tilde{\tau}$. Данное выражение будет максимально при $\tilde{\tau} = \tau$. Следовательно, оценка времени задержки определяется по формуле:

$$\tilde{\tau} = \arg \max \left(\int f(t - \tau) \cdot g(t) dt \right) \quad (10)$$

Однако такой метод может оказаться плохо применимым, если $f(t)$ и $g(t)$ являются откликом от сложного объекта на разных частотах, поскольку форма отклика может не совпадать. Это связано с тем, что в зависимости от частоты отклики от различных блестящих точек могут складываться синфазно (если расстояние между ними кратно половине длины волны) или противофазно. Поясним на примере (рис. 1).

Пусть наблюдаемый объект состоит из двух блестящих точек, разнесенных на расстояние 125 см (порядка одного элемента разрешения), низкочастотный сигнал имеет несущую 1200 МГц (длина волны 25 см), а высокочастотный – 1500 МГц (длина волны 20 см). Дисперсия отсутствует, так что разность задержек равна нулю. Поскольку расстояние между блестящими точками равно целому числу полуволн для низкочастотного и полуволну для высокочастотного сигнала, на высокой частоте точки разрешаются, а на низкой – нет. Из-за этого форма отклика не совпадает, и максимум корреляции дает ошибочное значение разности задержек (вычисляемое значение ТЕС равно 12,5 ТЕСU при истинном нулевом).

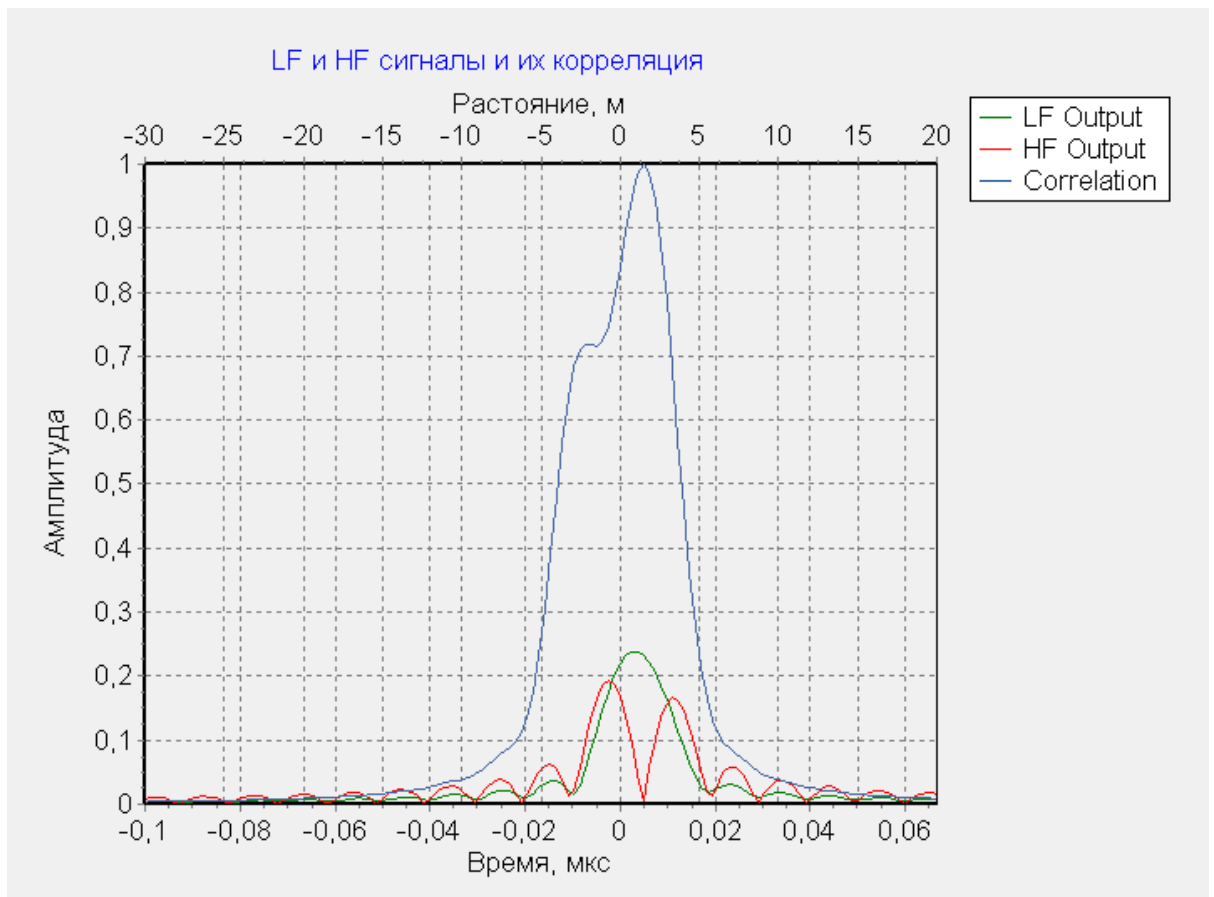


Рис. 1. Отклики от двухточечного объекта при целом и полуполном числе полуволин и их корреляция.

Если объект состоит из большого числа блестящих точек, расположенных в пределах нескольких элементов разрешения, то форма отклика на различных частотах может быть полностью непредсказуемой. Предлагается следующий метод: непосредственно измерять задержку как «центр масс» отклика:

$$\tilde{\tau} = \frac{\int t \cdot f(t) dt}{\int f(t) dt} \quad (11)$$

Преимущество данного метода в том, что положение «центра масс» не так существенно зависит от того, разрешены ли точки. Так, в приведенном выше примере оценка ТЕС новым методом равна 0,9 ТЕСУ

Недостатком предложенного метода является его неоптимальность при обработке сигнала на фоне шума. Положение центра масс шума может вызывать серьезные отклонения в оценке ТЕС. Чтобы ослабить этот эффект, следует учитывать лишь те отсчеты сигнала, которые превышают некоторый порог.

Вопрос, какой из методов лучше применять в реальных системах, остается открытым. Существуют такие конфигурации блестящих точек, при которых, по-видимому, ни один метод не позволяет правильно оценить разность задержек на различных частотах. Например, пусть объект состоит из четырех блестящих точек, причем на одной частоте складываются в противофазе отклики от ближних точек, а на другой – от дальних. В этом случае неизбежна ошибка определения задержки, равная $\frac{\Delta r}{c}$, где Δr – расстояние между ближней и дальней группой блестящих точек.

Оценим теперь, насколько ошибки при измерении задержки, связанные с особенностями отражения от сложного объекта на разных частотах, влияют на точность получаемого значения ТЕС. Формула для расчета ТЕС [2]:

$$TEC = \frac{3}{8080} \cdot \Delta\tau \cdot \left(\frac{1}{F_1^2} - \frac{1}{F_2^2} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где $\Delta\tau$ – разность задержек на низкой и высокой частоте в микросекундах, F_1 и F_2 – частоты несущих в МГц. Рассчитаем возможную ошибку определения ТЕС при $F_1 = 1400$ МГц, $F_2 = 1600$ МГц. Учтем, что ошибка измерения задержки может достигать $\frac{H}{c}$, где H – размер объекта.

Получаем, что ошибка определения ТЕС может достигать

$$Err(TEC) = 10,4 \cdot H. \quad (13)$$

Такая ошибка может сделать корректное определение ТЕС практически невозможным, так как размер наблюдаемых объектов может достигать десятков метров, а типичные значения ТЕС лежат в пределах 10-100 TECU. Отметим, однако, что такие большие ошибки возможны лишь при наиболее неудачной конфигурации и лишь для конкретных частот. Следует рассмотреть вариант одновременного использования трех или более фильтров, чтобы исключить такую возможность.

Выводы

1. Был предложен и исследован новый метод оценивания разности задержек радиолокационных сигналов на разных частотах, отраженных от сложного объекта, названный методом центров масс. Определено, что при низком отношении сигнал-шум предпочтительно использовать классический корреляционный метод. При высоком отношении сигнал-шум для некоторых конфигураций блестящих точек метод «центров масс» оказался более эффективным.
2. Существуют такие конфигурации блестящих точек, при которых корректная оценка разности задержек отклика от сложного объекта на двух разных частотах не представляется возможной для любого метода.

Список литературы

1. Виноградов А.Г., Лучин А.А., Теохаров А.Н. Обработка сверхширокополосных сигналов и формирования радиолокационных изображений в РЛС дальнего обнаружения L-диапазона // Научные технологии. 2013. Т. 14. № 9. С. 32–36.
2. Аджемов С.С., Виноградов А.Г., Лобов Е.М., Теохаров А.Н. Прямая оценка полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) путем специальной обработки широкополосного радиолокационного сигнала. // Сборник трудов научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2015», С-Петербург, 2015, с. 167–169.
3. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
4. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Ширмана Я.Д. // М.: Сов. радио, 1970.