

СРАВНЕНИЕ УГЛОМЕРНОГО И РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО МЕТОДОВ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ОХВАТА ТЕРРИТОРИИ ПРИ РАДИОКОНТРОЛЕ

В. А. Козьмин, директор по научной работе ЗАО «ИРКОС», к.т.н., доцент; kv@ircoc.vrn.ru

А. П. Павлюк, консультант ЗАО «ИРКОС», к.т.н., с.н.с.; alexander.pavlyuk@ties.itu.int

А. Б. Токарев, начальник НИС ЗАО «ИРКОС», к.т.н., доцент; TokarevAB@ircoc.vrn.ru

Приводится сравнение угломерного (технология АОА — Angle Of Arrival) и разностно-дальномерного (Time Difference Of Arrival — TDOA) методов местоопределения по критерию охвата территории при радиоконтроле. Показаны преимущества и недостатки таких систем в сетях радиоконтроля, состоящих из разного числа стационарных станций, взаимодействующих с мобильными станциями. Сформулированы рекомендации по использованию систем в различных условиях. Результаты работы могут оказать существенную помощь администрациям связи в деле развития их сетей радиоконтроля, тем более что в мире еще нет опыта практического использования системы TDOA для нужд наземного радиоконтроля.

Ключевые слова: радиоконтроль, сеть радиоконтроля, станции радиоконтроля, охват территории радиоконтролем, пеленгация, местоопределение, АОА, TDOA.

Введение. В настоящее время для определения координат источников радиоизлучений (ИРИ) при радиоконтроле на практике преимущественно используется метод пеленгации, предполагающей определение точки (а с учетом аппаратных погрешностей, имеющих место даже в условиях отсутствия шумов и помех, некоей области) пересечения линий пеленгов от двух или более радиопеленгаторов [1, 2 и 3]. Пеленгование, наряду с одновременной оценкой изменения амплитуды принимаемого сигнала [1], используется и мобильными станциями радиоконтроля (МСРК) для допосиска ИРИ на местности, например методом привода (homings). Эту технологию все чаще называют «угломерным» методом (Angle Of Arrival — АОА [3]).

Наряду с этим в последние годы все больше внимания стал привлекать «разностно-дальномерный» метод определения координат ИРИ на основе измерения разницы во времени прихода радиосигналов от ИРИ на несколько отстоящих друг от друга приемников [4]: на английском языке он получил название TDOA — Time Difference Of Arrival [3]. Геометрическим местом точек, отстоящих от двух пунктов с одной и той же разницей расстояний (т.е. с одной и той же разницей во времени прихода сигналов), является гипербола. Поэтому в TDOA-системах определение координат ИРИ осуществляется по точке (или области) пересечения гипербол, образуемых различными парами взаимодействующих приемников (рис. 1), а не по зоне пересечения линий пеленгов в системах АОА (рис. 2). Поэтому системы TDOA называют еще и гиперболическими [5], а соответствующие приемники, из-за их относительной простоты и малогабаритности, сенсорами [6] (ниже, для простоты и универсальности, и будем называть станциями).

Новая Рекомендация МСЭ-R «Эволюция радиоконтроля» [7] отмечает перспективность TDOA-систем в применении к задачам наземного радиоконтроля. По имеющей-

ся информации некоторые администрации уже планируют сети радиоконтроля, основанные на использовании системы TDOA или гибридного АОА/TDOA-оборудования [8—10], в том числе в пределах больших территорий.

Поскольку затраты на систему радиоконтроля обычно составляют основную долю суммарных затрат на организацию национальной системы управления использованием спектра, внедрение систем TDOA в дополнение к существующим сетям АОА или замена их на TDOA (или на гибридные АОА/TDOA-системы) по истечении срока действия для любой администрации является весьма серьезным шагом, имеющим существенные финансовые и организационные последствия. Администрация должна тщательно и всесторонне взвесить все «за» и «против», исходя из конкретных условий и перспектив развития.

В помощь администрациям в МСЭ-R выпущен Отчет SM.2211 [11], в котором довольно детально сравниваются TDOA- и АОА-системы по критериям сложности оборудования, возможности определения источников излучений с различными видами модуляции, защиты от отражений, шумов и помех, требованиям к системам обмена и обработки данных и т.д. Вместе с тем в отчете [11] недостаточное внимание уделено сравнению этих систем по критерию охвата территории местоопределением в сетях, состоящих из разного числа стационарных станций радиоконтроля (ССРК) в их взаимодействии с МСРК.

Представляется, что этот недостаток отчета [11] не позволил сформулировать в нем выводы об эффективности различных конфигураций локальных TDOA- и АОА-сетей радиоконтроля, состоящих из различного числа ССРК в их взаимодействии с МСРК, а именно этот критерий, наряду со стоимостью, может оказать решающее воздействие на выбор администрации в пользу той или иной системы.

В данной статье с учетом опыта разработки процедур планирования АОА-сетей радиоконтроля [12] предпринята попытка внести ясность в данный вопрос.

Анализ особенностей охвата местоопределением для различных групп АОА- и TDOA-станций можно провести на основе рассмотрения АОА- и TDOA-сетей радиоконтроля, содержащих по три взаимодействующих ССРК, поскольку они обеспечивают зоны, в которых перекрываются области охвата тремя и двумя ССРК, а также зоны, охватываемые лишь одной ССРК. Случай четырех и более взаимодействующих ССРК (т.е. с многократно перекрывающимися зонами охвата) в смысле условий определения координат ИРИ не имеет принципиальных отличий от случая трех ССРК с тремя перекрывающимися зонами охвата.

При этом необходимо иметь в виду, что анализ охвата местоопределением не может ограничиться дистанционной оценкой положения ИРИ лишь с помощью ССРК, как

это обычно делается применительно к TDOA [3, 10, 11]. Во многих случаях конечной задачей является обнаружение конкретного ИРИ на месте, а это можно выполнить только с помощью МСРК. Поэтому анализ должен включать и оценку эффективности совместного использования ССРК и МСРК в процессе определения координат и допоиска ИРИ или только МСРК в тех областях, которые не обслуживаются ни одной ССРК. Последнее весьма актуально для стран с большими территориями, имеющих существенно неравномерное распределение населенных пунктов и промышленных объектов (и, следовательно, подлежащих радиоконтролю ИРИ).

В процессе рассмотрения учтем только основные эффекты, т.е. пренебрежем влиянием отражений, шумов и помех на точность определения координат ИРИ и эффективность допоиска. Следуя [11], применительно к сети ССРК проведем сравнение только «чистых» TDOA- и АОА-систем, оставив за пределами рассмотрения гибридные системы. При этом под эффективностью везде будем понимать результативность оборудования радиоконтроля по размеру зон местоопределения ИРИ и трудоемкости его допоиска с помощью МСРК без учета сложности и стоимости соответствующего оборудования.

Рассмотрим охват местоопределением для трех ССРК (станции $FS1$ — $FS3$ на рис. 1 и 2), имеющих одну и ту же конфигурацию, но работающих в сетях TDOA (рис. 1) и АОА (рис. 2). Пусть сети также оснащены МСРК, обозначенными на рисунках как MS , с оборудованием той же самой технологии, что и ССРК. Индивидуальные зоны охвата каждой станции условно обозначены контурами различных цветов. Желтым цветом указана перекрывающаяся зона трех станций, в пределах которой обеспечивается определение координат ИРИ только силами ССРК без необходимости привлечения МСРК. Поскольку считается, что ССРК системы TDOA являются более чувствительными, соответствующие зоны охвата индивидуальными станциями $FS1$ — $FS3$ на рис. 1 представлены превышающими таковые на рис. 2. Необходимо отметить, что зоны охвата на обоих рисунках построены чисто условно по отношению к некому испытательному ИРИ, имеющему определенную мощность и высоту антенны. При изменении этих параметров границы зон охвата/обслуживания неизбежно изменятся в той или иной степени.

Для сети TDOA определение координат ИРИ только с помощью ССРК может быть выполнено исключительно в пределах зоны, обслуживаемой всеми тремя ССРК, т.е. там, где перекрываются их индивидуальные зоны охвата [3, 10, 11]. В пределах этой зоны координаты ИРИ определяются по области пересечения трех гипербол, как указано на рис. 1 применительно к ИРИ $T1$, где пересекаются гиперболы $1-2$, $3-1$ и $3-2$. Для сети АОА определение координат ИРИ с помощью только ССРК примерно с такой же высокой эффективностью осуществляется по пересечению линий пеленгов в пределах зоны, обслуживаемой всеми тремя ССРК, как это указано на рис. 2 по отношению к ИРИ $T1$ (линии пеленгов 1 , 2 и 3), и в зонах, обслуживаемых только двумя ССРК, как это указано там же по отношению к ИРИ $T2$ (линии пеленгов 4 и 5). В зависимости от конфигурации ССРК в сети зоны перекрытия двумя ССРК могут быть существенно больше зоны, перекрываемой тремя ССРК.

Если в сети TDOA искомый ИРИ лежит в зонах, перекрываемых только двумя ССРК (коричневые на рис. 1), оборудование может воспроизводить только одну гиперболу,

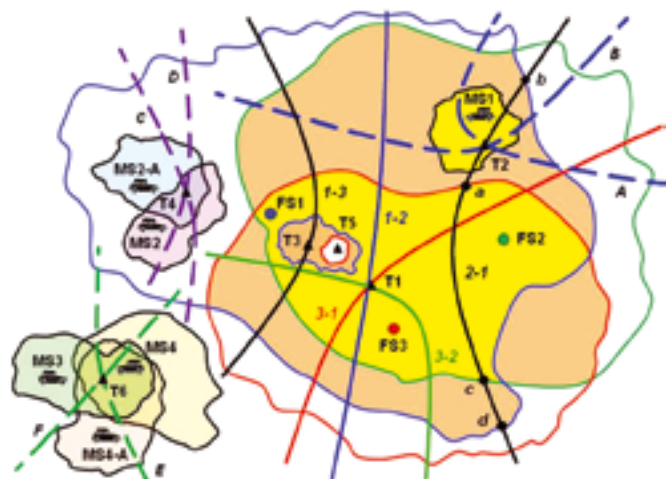


Рис. 1. Местоопределение в сети TDOA

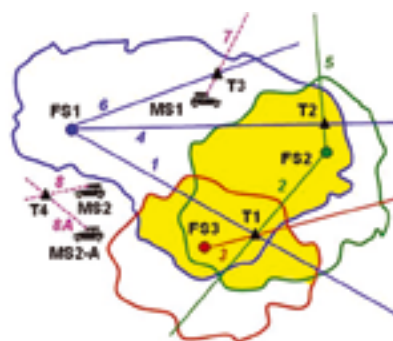


Рис. 2. Местоопределение в сети АОА

как это показано линией $2-1$ по отношению к ИРИ $T2$. Поэтому определение координат ИРИ в данном случае может быть осуществлено только с помощью МСРК ($MS1$ на рис. 1), которая взаимодействует с двумя ССРК, по области пересечения гиперболы $2-1$ с двумя другими, обеспечиваемыми этой МСРК (гиперболы A и B на рис. 1, представленные пунктирными линиями, чтобы подчеркнуть их изменчивость в процессе перемещения МСРК). При этом искомый ИРИ должен попасть в зону охвата МСРК, которая обычно невелика ввиду малой высоты ее антенны. Таким образом, на МСРК в зоне, перекрываемой только двумя станциями, в общем случае возлагается не только функция допоиска, но и функция дистанционного определения координат, что увеличивает трудоемкость и, следовательно, снижает эффективность работы МСРК.

В частности, если зоны охвата МСРК недостаточно, чтобы принимать сигнал ИРИ ($T2$ в рассматриваемом случае), оператор, имея только воспроизведенную гиперболу $2-1$, может сделать заключение, что искомый ИРИ наиболее вероятно находится где-то на краях гиперболы, т.е. в пределах ее участков $a-b$ или $c-d$, но не в центральной части, которая с большой вероятностью перекрывается всеми тремя ССРК, если рельеф местности не содержит там существенных неровностей. При этом оператор должен принять во внимание, что граничные точки таких участков ($a-b$ или $c-d$) неизвестны, поскольку границы зон охвата индивидуальных ССРК, включая перекрывающиеся, зависят от мощности и высоты антенны искомого ИРИ, которые обычно неизвестны вплоть до момента его обнаружения на месте. Поэтому участки $a-b$ и $c-d$ смещаются по гиперболу в сторону ее центра для маломощных ИРИ с низкими ан-

теннами и в направлении периферийных частей гиперболы в противном случае; расстояние между точками $a-b$ и $c-d$ при этом также меняется.

Необходимо отметить, что район расположения искомого ИРИ обычно ассоциируется с расположением приемника, подверженного помехе или (особенно в случае нелегальных ИРИ) он предположительно известен на основе других данных. При плотном расположении ССРК системы TDOA (например, в больших городах [10]) помеха приемнику, расположенному в нижней части рис. 1, может быть вызвана и ИРИ, расположенным в верхней части рис. 1, например ИРИ $T2$. Поэтому в ряде случаев мобильная станция должна переместиться вдоль всей (или значимой части) гиперболы, чтобы обнаружить искомый ИРИ на месте. Это может быть довольно трудоемко, что снижает эффективность обнаружения ИРИ оборудованием TDOA в зонах, перекрываемых только двумя ССРК.

Рассмотренные выше закономерности проявляются и в том случае, если, ввиду особенностей рельефа местности или городской застройки, зона, перекрываемая только двумя ССРК, лежит в пределах общей зоны, перекрываемой всеми тремя ССРК. Как показано на рис. 1, по отношению к ИРИ $T3$, в данном случае также воспроизводится только гипербола $1-3$ и для определения координат ИРИ на этой гиперболе необходимо использование МСРК.

Напротив, как было упомянуто выше, система АОА обеспечивает определение координат ИРИ в зонах, перекрываемых двумя ССРК, почти с такой же высокой эффективностью, как и в зоне, перекрываемой тремя и более ССРК. Как видно из сравнения гипербол $2-1$ и $1-3$ на рис. 1 и пеленга 4 от одиночной АОА станции $FS1$ на рис. 2, зона поиска МСРК системы TDOA в общем случае в два раза больше, чем МСРК системы АОА. Это опять-таки указывает на меньшую эффективность работы МСРК системы TDOA по сравнению с таковой системы АОА.

В зоне охвата только одной ССРК системы TDOA определение координат и допоиск ИРИ еще больше усложняются и еще большая нагрузка ложится на МСРК. МСРК, не имея никакого ориентира, кроме как положение приемника, подверженного помехе, или предполагаемый район размещения нелегального ИРИ, должна приблизиться к искомому ИРИ настолько, чтобы он попал в ее зону охвата, как это показано на рис. 1 на примере МСРК $MS2$ по отношению к ИРИ $T4$. Однако даже в этом случае будет воспроизведена только одна гипербола C . Для определения координат искомого ИРИ на этой гиперболе МСРК, соблюдая те же условия, должна переместиться в другую точку, например в точку $MS2-A$ на рис. 1, чтобы обеспечить вторую гиперболу D , пересекающую первую. Очевидно, что эти операции могут быть еще более трудоемкими, чем в рассмотренном выше случае наличия гиперболы в зоне, перекрываемой двумя ССРК, и, следовательно, еще менее эффективными, особенно в случае слабо развитой дорожной сети.

Тот же самый эффект имеет место и в случае, когда, ввиду особенностей рельефа местности или городской застройки, зона, обслуживаемая только одной ССРК, лежит в пределах общей зоны, перекрываемой всеми тремя ССРК. Как показано на рис. 1, по отношению к ИРИ $T5$, лежащему в зоне, обслуживаемой только станцией $FS3$, что условно показано красным контуром, сеть ССРК «не видит» такого ИРИ и определение его координат может быть осуществлено только с помощью подвижной станции по аналогии с описанным выше определением координат ИРИ $T4$.

В системе АОА обнаружение ИРИ с помощью МСРК по пеленгу, обеспечиваемому одной ССРК, является весьма обычной операцией, осуществляемой достаточно эффективно, по меньшей мере в условиях отсутствия отражений. В соответствии с рис. 2, чтобы обнаружить искомый ИРИ $T3$, станция $MS1$ должна просто следовать вдоль линии пеленга 6 , пока она не станет принимать сигнал этого ИРИ. После этого осуществляется допоиск искомого ИРИ по пеленгу самой МСРК. Если оператор захочет заранее определить вероятное положение искомого ИРИ (например, для выбора наиболее оптимального подъездного пути), он может сделать пеленг из некоей другой точки, как это условно показано линией пеленга 7 на рис. 2. Пересечение линий пеленгов 6 и 7 указывает координаты искомого ИРИ ($T3$ в рассматриваемом случае), что облегчает его последующий допоиск. В реальных условиях наличия отражений для определения наиболее вероятных координат искомого ИРИ может потребоваться несколько пеленгов от МСРК из нескольких различных точек.

Сколько-нибудь эффективное обнаружение мешающего или нелегального ИРИ вне зон охвата ССРК системы TDOA представляется маловероятным. Если все же попытаться это сделать, то для такой операции необходимо иметь как минимум две взаимодействующие МСРК (станции $MS3$ и $MS4$ на рис. 1).

В качестве первого этапа, исходя из положения приемника, подверженного помехе, или предполагаемого района нахождения нелегального ИРИ, две МСРК системы TDOA должны обеспечить попадание искомого ИРИ в их перекрывающиеся зоны охвата, чтобы была возможность обеспечить соответствующую гиперболу, а это представляется весьма проблематичным. Тем не менее прием сигнала от искомого ИРИ хотя бы одной МСРК покажет операторам, что искомый ИРИ находится где-то относительно недалеко, и одна из этих МСРК может продолжить поиск в данном районе до тех пор, пока гипербола не будет обеспечена (например, гипербола E между станциями $MS3$ и $MS4$ на рис. 1).

В качестве второго этапа одна из МСРК, соблюдая те же условия, должна переместиться в другую точку, как, например станция $MS4$ в точку $MS4-A$ на рис. 1, с тем чтобы обеспечить вторую гиперболу F и определить вероятные координаты ИРИ ($T6$ на рис. 1) по пересечению гипербол. Только после этого можно приступить к допоиску.

Для обнаружения ИРИ в пределах территории, не охваченной сетью ССРК системы АОА, необходима лишь одна МСРК. Например, станция $MS2$ на рис. 2 в условиях отсутствия отражений сразу же обеспечивает пеленг на искомый ИРИ (линия пеленга 8 на рис. 2), как только этот ИРИ попадает в зону ее охвата. Если оператор захочет заранее определить вероятное положение искомого ИРИ (например, для выбора наиболее оптимального подъездного пути), он может сделать пеленг и из некоей другой точки, как это условно показано линией пеленга $8A$ из точки $MS2-A$ на рис. 2. Пересечение линий пеленгов 8 и $8A$ указывает положение искомого ИРИ $T4$, что облегчает его последующий допоиск. В реальных условиях наличия отражений для определения наиболее вероятного положения искомого ИРИ может потребоваться несколько пеленгов от МСРК из нескольких различных точек. Такая процедура весьма широко используется многими администрациями связи, особенно в странах, обладающих большой территорией, значительная часть которой не может быть охвачена радиоконтролем с помощью ССРК по вполне понятным эко-

номическим причинам. В системе TDOA такая функция практически не может быть обеспечена.

Вышеприведенный анализ позволяет сделать ряд выводов. В сетях TDOA имеет место резкое снижение эффективности местоопределения на периферии ансамбля ССРК, т.е. там, где перекрываются зоны охвата только двух ССРК, и, тем более, имеется лишь зона охвата одной ССРК. Поскольку отношение площади, охватываемой ансамблем ССРК, к площади периферийной зоны возрастает с увеличением числа ССРК в ансамбле, эффективность сети TDOA повышается с таким увеличением числа ССРК. Это означает, что сети TDOA являются более эффективными при обслуживании больших городов и промышленных центров, где может быть установлено большое число ССРК на малых расстояниях друг от друга, чтобы имело место многократное перекрытие индивидуальных зон охвата (минимум тремя ССРК) для обеспечения реальной автоматизации процесса радиоконтроля, включая функцию определения координат ИРИ.

Напротив, обслуживать относительно малые города с ближайшими пригородами, а также изолированные промышленные центры более эффективно небольшим числом ССРК системы АОА, отстоящих друг от друга на относительно большие расстояния. В частности, весьма эффективно использование всего двух ССРК системы АОА [2], которые обеспечивают определение координат ИРИ в перекрывающихся зонах и пеленгование в пределах индивидуальных зон охвата.

Даже единственная ССРК системы АОА достаточно эффективна, поскольку в пределах своей территории обслуживания она обеспечивает (наряду с измерением параметров излучений) пеленги на искомые ИРИ, что существенно облегчает их последующий допоиск силами МСРК. В системе TDOA эффективность одиночных ССРК весьма мала.

МСРК системы TDOA могут успешно функционировать только в пределах указанного выше ансамбля ССРК этой системы. На периферии сети системы TDOA эффективность МСРК этой системы резко падает, тогда как в сети АОА она сохраняется довольно высокой. Поэтому в общем случае МСРК, оснащенные только оборудованием системы TDOA, не могут быть признаны достаточно эффективными. Не случайно в проектируемой сети радиоконтроля Македонии [8], например, планируется использовать МСРК только гибридной TDOA/АОА-системы.

Ориентация на использование МСРК гибридных TDOA/АОА-систем приводит к другому весьма важному выводу: для радиоконтроля новых радиосистем с перспективными широкополосными видами модуляции нельзя ориентироваться исключительно на TDOA-технологии. Необходимо соответствующее совершенствование и АОА-систем радиоконтроля, чтобы можно было компенсировать ими недостатки использования TDOA-технологии для мобильного радиоконтроля; иначе такая важная составляющая радиоконтроля, как мобильный, может быть не обеспечена.

Сеть ССРК системы TDOA, даже в случае наличия МСРК, более критична к зонам, обслуживаемым только двумя станциями и, тем более, только одной станцией, в пределах общей зоны охвата тремя и более станциями, чем сеть системы АОА. При увеличении относительной площади таких хуже обслуживаемых зон эффективность сети TDOA и возможность автоматизации местоопределе-

ния в ней резко уменьшаются, а задача такой автоматизации признается как главный побудительный мотив перехода на TDOA [9, 10]. Это требует более тщательного планирования сети ССРК системы TDOA, по сравнению с сетью АОА, для того чтобы минимизировать количество таких хуже обслуживаемых зон.

Заключение. Анализ показал, что и технология АОА, и технология TDOA имеют свои сферы эффективного применения для целей местоопределения в сетях наземного радиоконтроля, поэтому обе требуют дальнейшего совершенствования и развития. Для разработки процедур оптимального планирования TDOA и гибридных АОА/TDOA-сетей, опыта практического применения которых в мире пока нет, необходимы серьезные дополнительные исследования.

Пристальное внимание при этом следует уделить особенностям функционирования систем TDOA на границах зон обслуживания сети стационарных станций, где даже при наличии в системе МСРК эффективность местоопределения существенно снижается.

Проведенный качественный сравнительный анализ TDOA- и АОА-систем местоопределения ИРИ может послужить основой дополнения к Отчету МСЭ-R SM.2211 [11], направленного на помощь администрациям связи различных стран в планировании путей развития их сетей радиоконтроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства/ Под ред. А. М. Рембовского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М: Горячая линия-Телеком, 2012.
2. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Т. 1: Международная и национальная системы управления РЧС. Радиоконтроль и радионадзор/ Под ред. М. А. Быховского. — М: URSS, 2012.
3. МСЭ. Справочник. Контроль за использованием спектра. — Женева, 2011.
4. Радионавигационные системы LORAN-C и «ЧАЙКА». URL: <http://www.radioscanner.ru/info/article99>.
5. Recommendation ITU-R SM.1598 (10/2002). Methods of radio direction finding and location on time division multiple access and code division multiple access signals..
6. Agilent. N6841A RF Sensor for Signal Monitoring Network. Data Sheet. URL: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990—3839EN.pdf>.
7. Рекомендация МСЭ-R SM.2039 (08/2013). Эволюция мониторинга спектра.
8. TCI's Pioneering Hybrid Geolocation Technology Selected by Macedonia. URL: <http://www.spx.com/en/tci/company/news-articles/tci-macedonia-contract>.
9. Ofcom (UK). Automatic Monitoring System. URL: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/market-data-research/other/technology-research/research/spectrum-use/ams>.
10. Ofcom AMS. Final report // Publication number: QINETIQ/06/00039 — July 2006.
11. Отчет МСЭ-R SM.2211 (06/2011). Сравнение методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода и угле прихода сигнала.
12. Krutova O., Pavlyuk A. Planning procedures for spectrum monitoring networks in the VHF/UHF frequency range // Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2012. — Rome, Italy, September 2012. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6396919>.

Получено 16.10.13