

RECOMMANDATION UIT-R SM.1598

**Méthodes de radiogoniométrie et de localisation de signaux
à accès multiple par répartition dans le temps et à accès
multiple par répartition en code**

(Question UIT-R 28/1)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le développement considérable des réseaux de radiotéléphonie cellulaire augmente le risque de brouillages à l'intérieur et en direction de réseaux, en particulier aux frontières de pays situées aux limites de couverture de stations exploitées par différents opérateurs et/ou en cas de partage de bandes de fréquences ou de bandes adjacentes;
- b) que le maintien d'un niveau élevé de qualité de service revêt une importance cruciale pour les opérateurs et les utilisateurs du service;
- c) qu'il est nécessaire de fournir aux opérateurs et aux régulateurs les outils indispensables pour enquêter sur les cas de brouillages préjudiciables;
- d) que les techniques utilisées dans ces réseaux exigent des méthodes acceptables de radiogoniométrie;
- e) que les plaintes en brouillage portant sur les réseaux cellulaires modernes sont souvent difficiles à régler;
- f) que les systèmes utilisant les techniques à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) et à accès multiple par répartition en code (AMRC) représentent une partie importante des services de radiotéléphonie exploités actuellement dans le monde;
- g) que des appareils permettant d'effectuer la radiogoniométrie de signaux numériques sont désormais sur le marché,

recommande

- 1 que des fonctions de radiogoniométrie de signaux AMRT et AMRC utilisant la synchronisation soient mises en œuvre dans les stations de contrôle fixes et mobiles;
- 2 que le processus de radiogoniométrie repose sur des principes analogues à ceux figurant dans l'Annexe 1, et sur les méthodes décrites dans les Annexes 2 et 3.

ANNEXE 1

**Processus de radiogoniométrie et de localisation
de signaux AMRT et AMRC**

Pour la radiogoniométrie de signaux AMRT et AMRC, il est recommandé d'identifier préalablement le signal, avant ou pendant le processus de radiogoniométrie, de manière à pouvoir employer les méthodes applicables. A cette fin, il est intéressant d'associer des techniques de radiogoniométrie à des techniques d'identification préalable. En effet, en termes de précision et en cas de sources multiples, la combinaison de ces techniques est particulièrement efficace.

- Un radiogoniomètre capable de traiter des signaux discontinus tels que les signaux AMRT, AMRC ou duplex à répartition dans le temps devrait ainsi permettre l'application successive de plusieurs méthodes visant à améliorer la précision de la radiogoniométrie en aveugle et en temps réel dans une première étape, conformément aux méthodes courantes recommandées à l'Annexe 2.
- La radiogoniométrie devrait porter sur un enregistrement du signal sur un seul canal ou, de préférence, sur plusieurs canaux.
- L'identification préalable du signal par intercorrélacion avec des signaux d'essai devrait être effectuée en temps réel ou en temps légèrement différé.

Et

- Si le processus d'identification préalable échoue, la radiogoniométrie en aveugle, telle que décrite à l'Annexe 2 (utilisée à l'aide des méthodes de synchronisation et éventuellement de haute résolution) peut être effectuée en temps réel ou en temps différé (au moyen d'un signal enregistré sur des canaux multiples), afin d'obtenir une meilleure précision angulaire, tout en augmentant les possibilités de discrimination des sources dans des environnements moyennement difficiles (trajets multiples, sources multiples).
- Si le processus d'identification préalable réussit, la radiogoniométrie utilisée en combinaison, telle que décrite dans l'Annexe 3, peut être effectuée en temps réel ou en temps différé (au moyen d'un signal enregistré sur des canaux multiples), afin d'obtenir une meilleure précision angulaire, tout en augmentant considérablement les possibilités de discrimination des sources dans des environnements défavorables (trajets multiples, forte densité de sources).

ANNEXE 2

Radiogoniométrie en aveugle au moyen de signaux AMRT

Si l'onde n'est pas identifiée ou ne peut pas être identifiée au moyen du processus d'identification préalable, et si aucune information n'est disponible sur un paramètre de discrimination possible à l'intérieur du signal (utilisation en aveugle), il est recommandé d'appliquer les méthodes de radiogoniométrie énumérées ci-après:

Toutes ces méthodes pourraient être améliorées par l'emploi d'antennes directionnelles, par la reconnaissance préalable de leurs paramètres techniques (porteuse, largeur de bande, type de modulation, durée des intervalles, etc.), lorsqu'ils sont disponibles, et par des mesures multiples (pour les processus de triangulation, de radorallieement, etc.).

- L'interférométrie traditionnelle ou corrélative (en série ou en parallèle au moyen de canaux multiples) peut être associée à la synchronisation de signaux par détection d'énergie. L'interférométrie a pour principe le calcul du temps de propagation de phase entre les signaux détectés par plusieurs détecteurs, et la comparaison entre le résultat obtenu et une table d'étalonnage, afin de déterminer la direction d'une source. La synchronisation du radiogoniomètre avec le temps d'arrivée des créneaux temporels, déterminés par un calcul de l'énergie des signaux, présente de nombreux avantages:
 - le radiogoniomètre se déclenche pendant la durée effective d'un créneau temporel;
 - sauf en cas de brouillages entre créneaux temporels (voir plus bas), le radiogoniomètre est déclenché par un signal provenant d'une seule source.

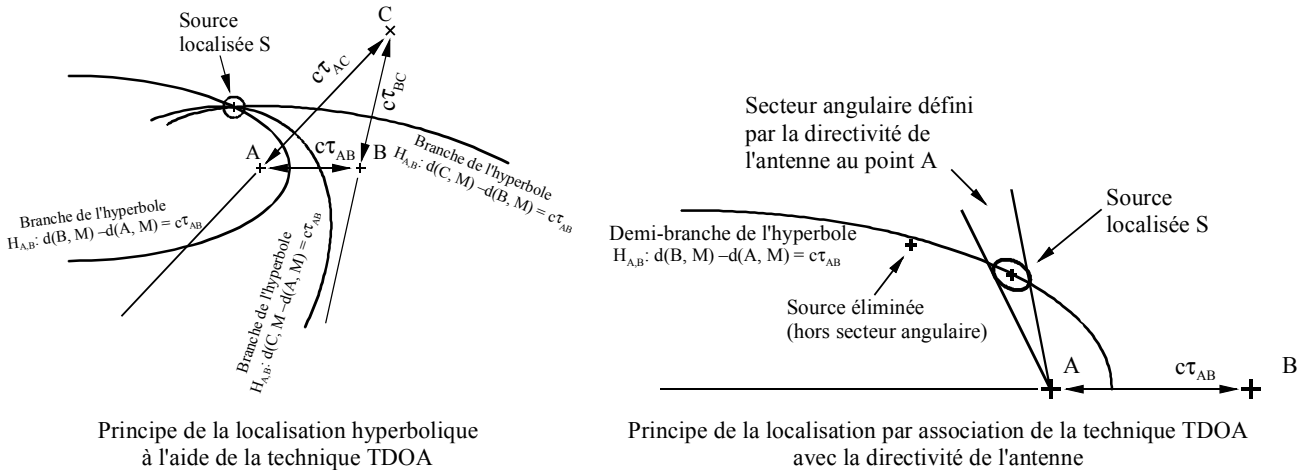
Contrairement à un radiogoniomètre en série, un radiogoniomètre en parallèle présente l'avantage que la commutation de l'antenne n'est pas nécessaire. Ainsi, la durée de l'intégration du signal permet d'accroître le gain et la précision d'environ 7 dB pour une mesure prise pendant la durée d'un créneau temporel.

- Des méthodes courantes à haute résolution, telles que l'algorithme MUSIC, permettent de faire face à des situations de réception plus complexes se caractérisant par des brouillages ou par des conditions de propagation défavorables. Ces méthodes, qui consistent à calculer et à réduire la matrice d'autocorrélation du signal reçu par chaque détecteur d'un réseau d'antennes, nécessitent une puissance de traitement et un temps de propagation plus élevés que la méthode d'interférométrie corrélative. Elles présentent les avantages suivants:
 - meilleure précision par rapport à l'interférométrie corrélative;
 - calcul de la radiogoniométrie même en cas d'émissions multiples ou de brouillages de densité faible à moyenne (en fonction du nombre d'éléments d'antenne);
 - radiogoniométrie possible même dans des conditions de propagation à trajets multiples;
 - comme pour l'interférométrie corrélative, possibilité de synchroniser le radiogoniomètre avec le temps d'arrivée des créneaux temporels des signaux AMRT, avec les nombreux avantages mentionnés dans le précédent paragraphe.
- La technique de décalage des instants d'arrivée (TDOA, *time difference of arrival*) est fondée sur l'intercorrélation des signaux numériques reçus par un ensemble de détecteurs suffisamment distants et synchrones pour permettre la localisation hyperbolique de la source. Le principe de base de cette méthode dans une géométrie plane est le suivant: soit un seul émetteur et un couple d'antennes synchrones (A et B) situées à une distance convenable, le processus d'intercorrélation des signaux reçus à chaque antenne A et B permet de déterminer un TDOA τ_{AB} , qui, associé à la position des antennes A et B et à la TDOA τ_{AB} , permet de définir la branche hyperbolique H_{AB} , sur laquelle se situe l'émetteur, soit un autre couple d'antennes synchrones distantes (A, C). Le même processus d'intercorrélation des signaux reçus à chaque antenne A et C, associé à la position de ces dernières et à la TDOA τ_{AC} , permet de définir la branche hyperbolique H_{AC} sur laquelle se situe l'émetteur. La position de l'émetteur est donnée par l'intersection des branches hyperboliques H_{AB} et H_{AC} . Il convient de noter que, même en présence d'un seul émetteur, des ambiguïtés géométriques peuvent se produire, la précision dépendant fortement de la configuration géométrique. Cela peut être évité si l'on utilise des antennes directives ou un processus de radiogoniométrie supplémentaire.

En cas de sources multiples, la technique TDOA peut être améliorée par l'emploi d'antennes directionnelles permettant de limiter le champ de balayage, ainsi que le risque d'ambiguïté dû à la présence de plusieurs émetteurs, et le risque d'association incorrecte de TDOA à différents émetteurs. En outre, l'emploi d'antennes directionnelles permet de limiter le nombre de mesures synchrones à seulement deux antennes. La position hyperbolique peut ensuite être utilisée pour améliorer la précision obtenue à partir des mesures angulaires, ou pour lever les ambiguïtés.

FIGURE 1

Localisation en aveugle à l'aide de la technique TDOA



1598-01

La technique TDOA peut également être employée en aveugle dans le cas d'ondes à spectre étalé (modulation AMRC) et en combinaison avec d'autres techniques, mais elle présente moins d'intérêt que les techniques recommandées ci-dessous, dans le cadre de la présente étude. On envisagera les techniques TDOA en aveugle ou en combinaison pour localiser les appels de détresse, sur la base des infrastructures des réseaux cellulaires.

ANNEXE 3

Combinaison d'ondes à modulation AMRT et d'ondes à modulation AMRC par codes courts ou connus

Dans ce cas, qui s'applique aux signaux utilisant la modulation AMRT ou AMRC par codes courts, les paramètres normalisés de l'onde figurent dans les canaux de service et de trafic, et sont émis en continu ou à intervalles déterminés dans des intervalles AMRT, des codes PILOT ou des codes de synchronisation dans le cas de protocoles AMRC, etc. Dans le présent document, ces signaux seront désignés sous le nom de signaux connus. Les différentes options possibles sont les suivantes:

- L'interférométrie en série ou en parallèle traditionnelle ou corrélative est associée à la synchronisation du signal par intercorrélation. L'interférométrie consiste à calculer le temps de propagation de phase entre les signaux détectés par plusieurs détecteurs, et à comparer les résultats obtenus avec une table d'étalonnage, afin de déterminer la direction d'une source. La synchronisation du radiogoniomètre avec le temps d'arrivée des créneaux temporels, déterminés par le calcul de l'intercorrélation des signaux à l'aide d'une séquence de référence figurant dans ceux-ci, présente un avantage accru par rapport aux techniques en aveugle. Un autre avantage réside dans l'amélioration du processus de synchronisation, rendu plus sensible et plus fiable grâce à l'exploitation des séquences connues des signaux.

Cette technique suffit dans un grand nombre de cas concrets à faible densité.

- L'interférométrie en parallèle combinée repose sur la détermination d'une référence de phase par chaque détecteur, par intercorrélation totale ou partielle des signaux reçus avec le signal discriminant (une intercorrélation partielle peut être envisagée dans le cas de protocoles AMRC utilisant de longs codes (IS 95, Globalstar)). L'ensemble des temps de propagation de phase est comparé avec une table d'étalonnage.

Cette technique présente de nombreux avantages:

- elle permet d'améliorer la détection en raison de l'intercorrélation à canaux multiples, augmentant ainsi fortement la sensibilité du radiogoniomètre ainsi que ses performances en cas de sources multiples;
- la résolution obtenue sur la mesure brute de la phase est d'environ $cT_S/2$ à cT_S , T_S représentant la durée d'un symbole (ou d'un élément dans le cas d'une synchronisation sur des codes de protocoles AMRC). La précision est encore meilleure lorsqu'on utilise des rapports confortables $C/(N+I)$. Cette mesure brute à précision intrinsèque permet d'améliorer simultanément la convergence de la position (en limitant le nombre de relèvements), ainsi que sa précision et sa fiabilité;
- elle permet de séparer les sources situées dans la même bande, lorsqu'elles utilisent des séquences, des mots ou des codes de synchronisation différents, et ainsi de prendre en charge plusieurs missions, lorsque les sources présentent des caractéristiques de discrimination différentes ou lorsqu'elles sont séparées par un délai de propagation de phase plus long que la durée de quelques symboles;
- elle permet d'effectuer des comptages, de mesurer des pourcentages d'occupation (occupation de créneaux temporels dans le cas de protocoles AMRT, occupation de codes dans le cas de protocoles AMRC), et d'associer des mesures de position à des mesures techniques.
- Les techniques adaptatives à canaux multiples reposent sur l'exploitation des matrices d'autocorrélation et sur l'intercorrélation des signaux avec les séquences de référence contenues dans ceux-ci. Elles peuvent être mises en œuvre à l'aide de deux méthodes différentes:
 - *Synchronisation à canaux multiples et radiogoniométrie générique à haute résolution:* (méthodes MUSIC, ESPRIT et méthodes dérivées, etc.). Cette méthode, dont il est question plus haut, permet d'améliorer les performances du radiogoniomètre par interférométrie, dans le cas de sources multiples ou de problèmes de propagation (trajets multiples).
 - *Synchronisation à canaux multiples et séparation de sources à l'aide de techniques adaptatives et d'une méthode spéciale de radiogoniométrie à haute résolution:*
 - Les méthodes de synchronisation par filtrage adaptatif font appel à des filtres adaptatifs spatio-temporels propres à optimiser la détection et la réception de sources AMRT ou AMRC. Elles sont employées en outre pour démoduler les signaux émis tout en rejetant les signaux brouilleurs. Elles permettent, en particulier, d'éliminer les brouillages dans un même canal ou dans un canal adjacent, qui se produisent dans des réseaux cellulaires ou dans des réseaux utilisant des sources multiples, la position des sources étant obtenue à partir de leur identification (par exemple, dans le cas d'un réseau GSM, on démodule et on décode les canaux balise pour extraire les données d'identification des stations de base, telles que les données BSIC, CI ou LAC, dans des réseaux GSM, permettant

de déterminer la position des stations après consultation de l'opérateur, ainsi que les données de synchronisation (le numéro de trame) permettant de synchroniser les radiogoniomètres en réseau).

- Les méthodes à canaux multiples permettent en outre d'utiliser un processus de radiogoniométrie à haute résolution extrêmement précis destiné aux ondes AMRT et AMRC, même en cas de fortes perturbations (brouillages), telles que représentées sur les Fig. 2 à 4.

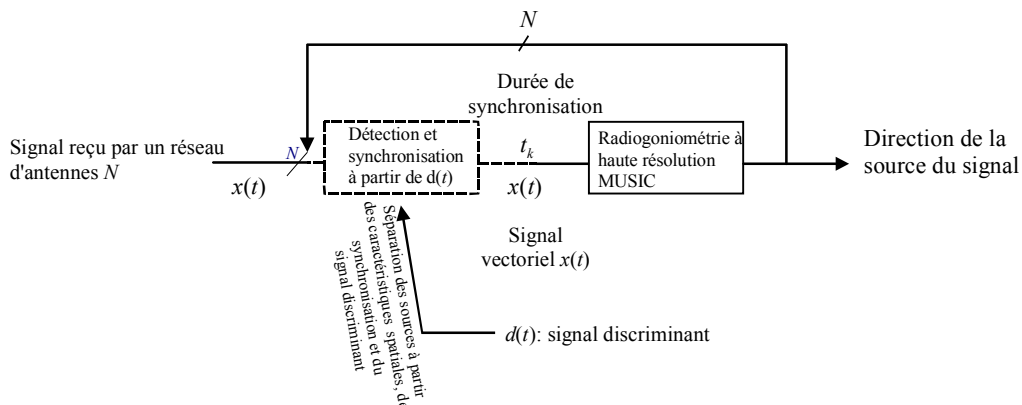
Les techniques adaptatives complètent ainsi très efficacement les solutions proposées précédemment en cas de conditions très difficiles: propagation dans un environnement urbain dense, réutilisation intensive des fréquences dans les réseaux cellulaires de deuxième et de troisième générations, signaux à forte incidence, etc., en particulier lorsque plusieurs réflecteurs rapprochés les uns des autres perturbent le front d'onde et empêchent une localisation angulaire précise (ce qui arrive couramment dans les zones urbaines).

Les techniques adaptatives susmentionnées sont particulièrement adaptées aux situations complexes et au post-traitement à des instants légèrement différents.

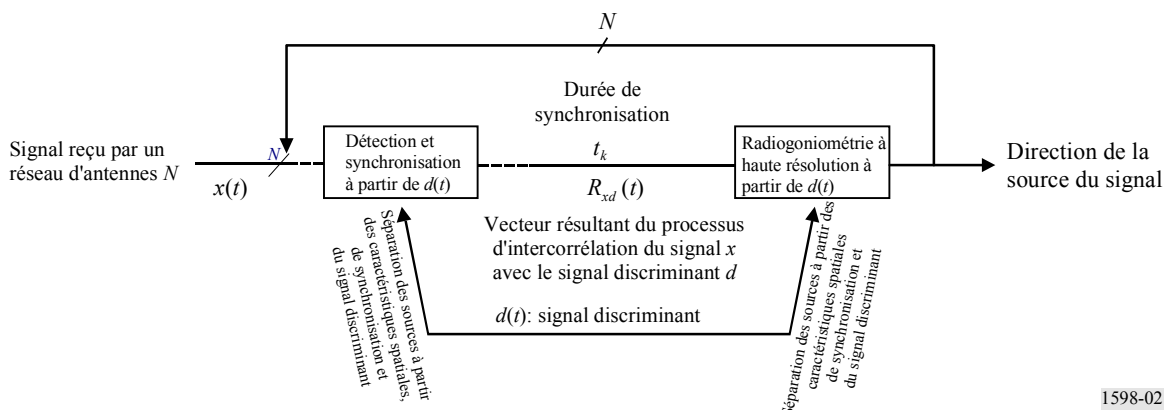
FIGURE 2

**Méthodes de radiogoniométrie à haute résolution utilisées en combinaison;
Exemple de mise en oeuvre concrète**

Application d'une méthode générique de radiogoniométrie à haute résolution avec ou sans processus de synchronisation préalable fondé sur le signal discriminant



Application d'une méthode de radiogoniométrie à haute résolution spécialement destinée au signal discriminant d

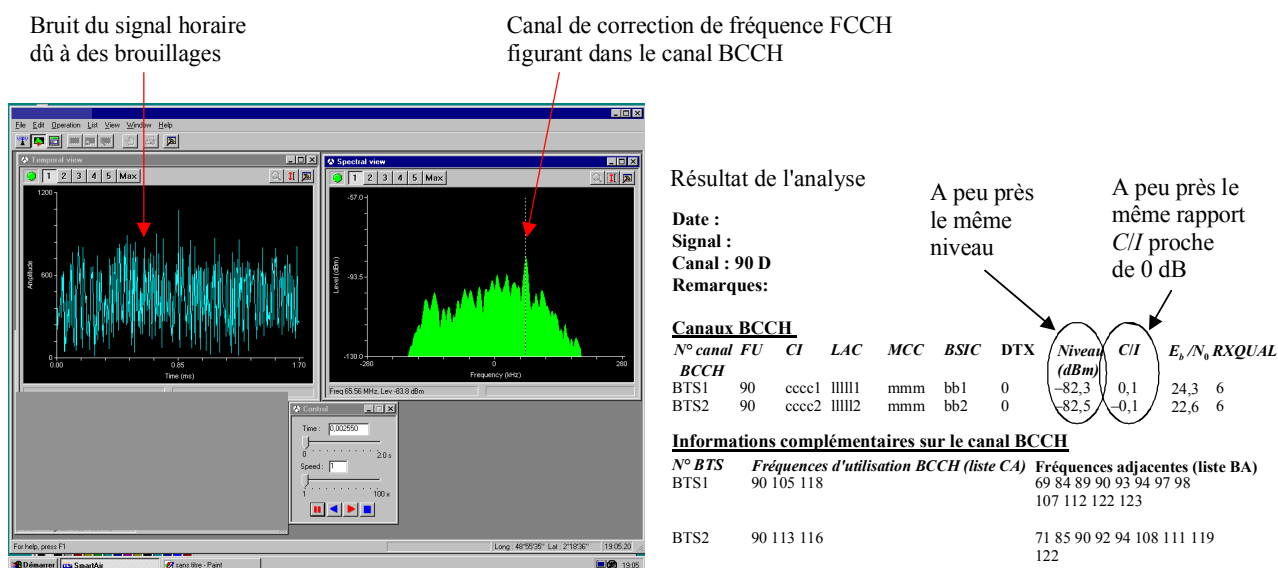


Ces méthodes et leurs résultats correspondants sont illustrés par les Fig. 2 à 4:

- la Fig. 2 représente deux mises en œuvre concrètes possibles de la synchronisation à canaux multiples et des fonctions de radiogoniométrie contenues dans des systèmes de contrôle et de mesure du spectre;
- la Fig. 3 donne les résultats de la méthode de filtrage adaptatif dans deux cas réels de brouillage se produisant dans des réseaux GSM;
- la Fig. 4 donne un exemple de résultats obtenus à l'aide des méthodes de séparation de sources et de radiogoniométrie dans des cas de brouillage mettant en jeu des fréquences balise GSM. Ces résultats ont également été obtenus à partir de cas réels de brouillage, se produisant dans un réseau GSM.

FIGURE 3

Exemple de synchronisation, identification et localisation de sources dans des réseaux GSM, à l'aide de filtres adaptatifs, dans des conditions de réception défavorables



Durée du signal et spectre (copie d'écran)

Rapport

Conclusion: Les stations de base BTS1 et BTS2 ont à peu près le même niveau de BCCH. Le niveau de brouillage entre canaux BCCH est élevé.

Cas de brouillage simple faisant intervenir des canaux de signalisation (canaux BCCH sur des fréquences balise)

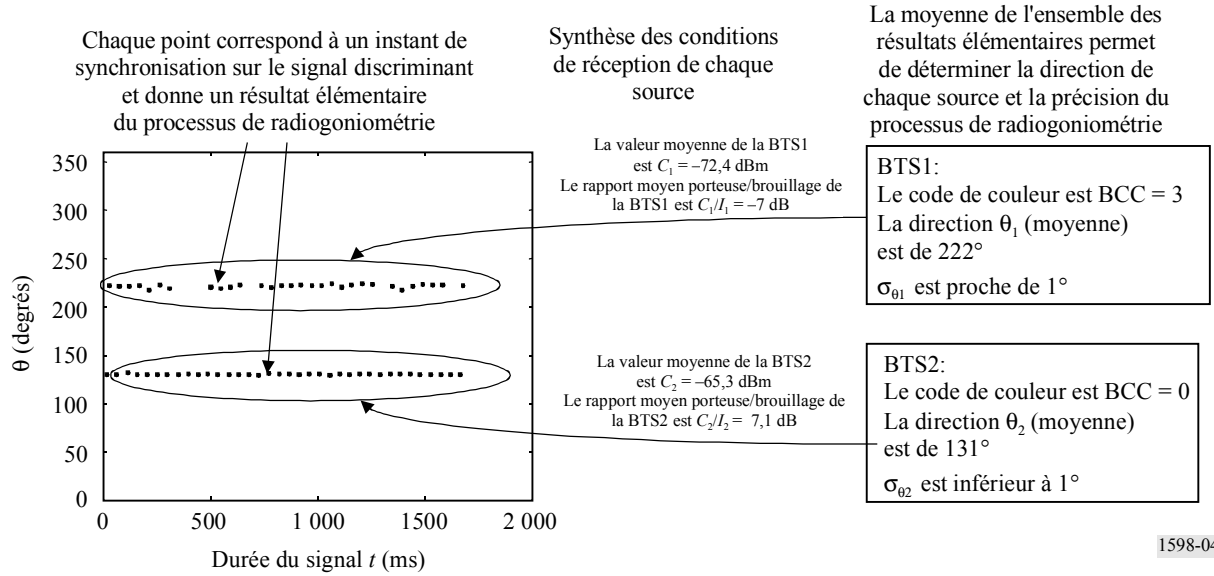
Note 1 - Les paramètres d'identification des réseaux et des éléments (MCC, MNC, CI, LAC, etc.) sont décodés mais leurs valeurs réelles sont masquées pour des raisons de confidentialité.

FIGURE 4

**Méthodes de radiogoniométrie à haute résolution;
exemple de résultat dans un réseau GSM**

Exemple de résultats radiogoniométriques obtenus à l'aide d'une méthode à haute résolution et d'une synchronisation à partir d'un signal GSM discriminant:

La radiogoniométrie de deux stations de base GSM partageant la même fréquence est obtenue à l'aide d'un réseau de cinq antennes et d'un signal enregistré pendant deux secondes. Le signal discriminant utilisé ici est constitué de la salve SCH transmise sur les fréquences balise GSM.



1598-04